L'Art et la science des voiles

DE
TOM WHIDDEN
ET
MICHAEL LEVITT

Éditions Zeraq

L’Art et la science des voiles

de
TOM WHIDDEN ET MICHAEL LEVITT
NORTH SAILS GROUP, LLC, MILFORD, CONNECTICUT, USA

Éditions Zeraq

L'Art et la science des voiles

Titre de l'édition américaine :
The Art and Science of Sails Revised Edition
© North Sails Group, LLC

Aucune partie de la présente publication ne peut être utilisée ou reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation écrite préalable, à l'exception de courtes citations dans des articles et revues critiques.

Imprimé en Italie
par LRC Printing

Pour l'édition française, © 2017 Éditions Zeraq sarl
Mise en page par Darcy Magratten et Tim Murphy
Traduction de Kade Sergent avec le soutien technique de
Gautier Sergent
Révision : Yvan Gradis

Première édition mars 2018
Dépôt légal février 2018

Diffusion CEDIF-Pollen
Distribution Pollen Diffusion

www.zeraq.fr
9, rue Magnificat - 33200 Bordeaux
contact@zeraq.fr

ISBN 979-10-93860-27-5

L’Art et la science des voiles

Remerciements

Bon nombre de personnes ont contribué à l'écriture et à la réalisation du présent ouvrage : *L'Art et la science des voiles*. Parmi elles, Jay Hansen, ancien vice-président exécutif de North Technology Group, a dirigé la partie technique, grandement assisté par le Dr Michael Richelsen, directeur technique de North Sails. En outre, nous avons eu le soutien de Tom Davis, directeur des matériaux pour North, Brian Doyle, directeur technique des matériaux, Dan Neri, COO (directeur chargé des opérations) du groupe North Sails, ainsi que Chris Williams et Steve Calder, dessinateurs de voiles de longue date pour North. Le chapitre 3 sur l'aérodynamique repose une nouvelle fois sur les travaux et les écrits du défunt Arvel Gentry, ancien aérodynamicien chez Boeing. La mise en pages a été réalisée par Darcy Magratten (version anglaise) et Tim Murphy (version française), la révision de la copie par Tim Murphy. La traduction française a été réalisée par Kade Sergent avec le soutien technique de Gautier Sergent, maître-voilier et responsable R&D pour North Sails. La responsable de la production est Wendy Wentworth, et les responsables images sont Jay Goebel et Mark Smith.

Table des matières

Introduction 6

Chapitre 1 | L'artiste et le scientifique 16

Chapitre 2 | L'importance des matériaux et des techniques 30

Chapitre 3 | La science des voiles 48

Chapitre 4 | L'aérodynamique : de la théorie à la pratique 66

Chapitre 5 | Les voiles moulées en trois dimensions : 3DL et 3Di 84

Chapitre 6 | La voile numérique 108

Chapitre 7 | La grand-voile 118

Chapitre 8 | Les voiles d'avant 132

Chapitre 9 | Les voiles de portant 148

Stars&Stripes

Introduction

par Tom Whidden

Quand nous avons décidé, Michael Levitt et moi-même, de mettre à jour *L'Art et la science des voiles*, je pensais qu'un simple travail de réécriture suffirait. Après tout, notre ouvrage a été publié il y a seulement vingt-six ans (la première édition par St. Martin's Press en 1990, et la présente par le groupe North Sails, LLC). Initialement, nous pensions que les méthodes pour améliorer la performance des bateaux – en termes de vitesse et de distance – ne pouvaient pas avoir tant évolué au cours de cette période relativement courte.

Le métier de maître-voilier existe depuis environ 5 200 ans, peut-être plus. Vingt-six ans, c'est juste une goutte d'eau dans l'océan. Mais, en examinant chaque chapitre, nous nous sommes vite rendu compte, Michael et moi, que ces dernières années ont changé à jamais notre façon d'appréhender les voiles, les mâts, le gréement, autrement dit ce qui constitue le « moteur du bateau ».

Si dans les années quatre-vingt-dix, la recette pour fabriquer des voiles était composée d'un tiers d'art et de deux tiers de science, en 2016, la proportion d'art s'est considérablement amenuisée. N'en déplaise à certains. Mais si l'on veut devancer son adversaire, avoir des voiles plus faciles à régler et plus résistantes avec une plage d'utilisation plus importante (et donc des voiles moins onéreuses) ou des voiles plus légères pour réduire la gîte de son voilier et gagner en vitesse, on devrait s'en réjouir.

Aujourd'hui, la majorité de nos voiles performance sont fabriquées sur des moules ajustables qui leur donnent une forme quasi inaltérable dans le temps. Les dessinateurs peuvent envoyer un fichier numérique à une usine North 3D depuis les quatre coins du monde, préciser les propriétés exactes et le choix des matériaux, et fournir un plan de drapage en fonction des charges calculées. Une fois le moule mis en forme, puis le matériau déposé sur le moule, placé sous vide et chauffé, il en résulte une copie parfaitement fidèle à la création du dessinateur. L'époque des développements empiriques sur le bateau est révolue. Le concepteur peut modéliser la forme volante et les charges sur cette même voile, ainsi que le gréement qui la supporte, avant toute mise à poste. Grâce aux nouveaux matériaux très résistants, faciles à mouler et aux faibles allongements, les voiles sont des répliques fidèles du dessin, et leurs formes volantes quasiment identiques aux modèles numériques.

Le changement le plus marquant vient notamment de notre connaissance plus approfondie de l'aérodynamique, des propriétés des matériaux – en particulier les adhésifs – et de leur application. À vrai dire, l'approche artistique de la voilerie ne convient plus aux nouveaux matériaux de voile ultrarésistants. Pour cette raison, la seconde version de *L'Art et la science des voiles* met davantage l'accent sur la nouvelle approche scientifique de la voilerie et sur notre meilleure compréhension dans ce domaine que sur l'aspect artistique.

Les voileries les plus sophistiquées utilisent, aujourd'hui, et surtout à bon escient, les logiciels tels que les codes RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Navier-Stokes fait référence à un ensemble d'équations rendues publiques en 1822. De nos jours, nous les appellerions des « algorithmes ». Ces équations précèdent de quatre-vingt-un ans le premier vol en avion effectué par les frères Wright précisément le 17 décembre 1903. Les codes RANS occupent actuellement le premier plan dans la voilerie, et dans l'aérodynamique en général. Le chapitre 6, « La voile numérique », consacré à cette thématique, explore l'utilisation et notamment l'interprétation de ces codes informatiques.

En face, Dennis Conner et son tacticien Tom Whidden (en arrière-plan) lors de leur victoire de la Coupe de l'America de 1986-1987 à Perth, en Australie. Avec l'aide de Whidden, Conner gagne la Coupe de l'America en 1980 sur le voilier *Freedom* à Newport à Rhode Island, mais ils perdent le trophée en 1983 à bord du *Liberty* face au bateau *Australia II*. Conner et Whidden font de nouveau équipe lors de la campagne triomphante, mais très controversée, de 1988 à San Diego où Ils défient sur leur catamaran le « big boat » de l'équipe néo-zélandaise. Cette édition marquait les prémices des multicoques à aile rigide dans l'histoire de la Coupe de l'America. « Très peu de marins ont été autant impliqués que Whidden avec huit campagnes et trois victoires à son actif », témoigne le Hall of Fame de la Coupe de l'America. (Photo Daniel Forster.)

B2, un TP 52 appartenant à l'Italien Michele Galli, grand vainqueur de la Rolex Middle Sea Race en octobre 2015. Sur cette photo, le voilier contourne l'île de Levanzo en mer Méditerranée. Il décroche la victoire d'une petite avance de 9 secondes. *B2* arbore des voiles North Sails 3Di. (Photo Carlo Borlenghi/Rolex.)

Néanmoins, combiner l'aérodynamique à la voile peut s'avérer délicat. Ou, comme l'a mentionné le défunt aérodynamicien américain Arvel Gentry qui a commencé à enseigner l'aérodynamique aux navigants dans les pages de *Sail Magazine* en 1973 et dont l'aide a été si précieuse dans les deux éditions de ce livre : « L'aérodynamique n'est pas une science intuitive. » Et c'est bien là toute la difficulté. Intuitive ou non, elle fonctionne. Prenons l'exemple de *Vestas Sailrocket 2*. Ce trimaran à foils, barré par l'Australien Paul Larsen, a pulvérisé le record de vitesse à la voile le 24 novembre 2012, en atteignant les 65,45 nœuds (121 km/h) sur un parcours de 500 mètres dans la baie de Walvis en Namibie. C'est 3 fois la vitesse du vent (chapitre 3). Autres exemples, en 2013, *Emirates Team New Zealand* établissait un record de course dans la Coupe de l'America à San Francisco de 47,58 nœuds (88 km/h) dans 21,8 nœuds de vent. C'est 2,2 fois la vitesse du vent (chapitre 4). Le maxi-monocoque américain *Comanche* de 100 pieds, propriété de Jim et Kristy Hinze Clark, et barré par Ken Read, président de North Sails, a battu le record des 24 heures à la voile en monocoque, en couvrant 618 milles (1 144,5 km) lors de la Transatlantic Race en 2015, à une vitesse moyenne de 25,75 nœuds (47,7 km/h). Quant aux chars à glace, ils peuvent avancer 5 fois plus vite que la vitesse du vent.

Comme l'évoque le titre de cet ouvrage, c'est ce qu'on appelle l'art et la science des voiles. La seconde édition conserve le même titre, mais avec un contenu complètement différent. Environ 95 pour cent du texte est nouveau tout comme la majorité des illustrations signées des plus grands photographes de la voile, tels que Daniel Forster, Carlo Borlenghi et Kurt Arrigo. Ces images ont été, pour la plupart, généreusement offertes par Rolex, une entreprise associée à la magie de la voile et à la quête de l'excellence en matière d'art et

de science. Le livre inclut également des photographies offertes par la Volvo Ocean Race. Toutes les illustrations ont été mises à jour.

Cette nouvelle édition se présente comme suit : le **premier chapitre** a subi de petites modifications et établit une base de référence. Intitulé « L'artiste et le scientifique », ce chapitre trace le portrait de deux grandes personnalités de la voile : Ted Hood et Lowell North. Avec le recul, il est frappant de voir que ces deux titans de l'industrie semblent être les derniers de leur espèce. Un peu comme si on imaginait le golfeur Bobby Jones sans Arnold Palmer, Jack Nicklaus ou Tiger Woods. L'une des raisons de cette disparition est probablement que la technologie a permis la production de voiles décentes. Autrement dit, quand l'art était la clé, nous avions besoin de Hood comme champion en titre et de North dans le rôle du scientifique ou de l'ingénieur. Lorsque l'équilibre a basculé en faveur de la science, ils n'étaient plus aussi indispensables. Mais la rivalité entre ces deux hommes, et d'autres comme eux, a mené la voilerie à un niveau qu'elle n'aurait jamais atteint, ou peut-être, plus exactement, jamais aussi rapidement.

Le **chapitre 2**, « L'importance des matériaux et des techniques », soulève un point saillant : les matériaux utilisés dans la voilerie n'ont pas évolué depuis plus de vingt-cinq ans alors que leurs procédés d'utilisation ou la technique ont radicalement changé. La majorité des tissus à voile modernes sont fabriqués à base de fibres industrielles. Si le nom de ces fibres est bien connu des marins, leurs propriétés ne sont pas aussi bien comprises. Ce chapitre décrit les fibres et matériaux les plus répandus dans la voilerie – polyester, aramide, film Mylar, carbone, Spectra/Dyneema, Vectran, Pen, nylon et Cuben Fiber – ainsi que leurs utilisations, leur durabilité et leur coût. Il analyse également l'impact indéniable des procédés de fabrication dans le monde de la voilerie (disposition des panneaux : crosscut, coupe horizontale, tissus pour voile radiale faite à partir de panneaux orientés chaîne, 3DL et 3Di).

Dans le **chapitre 3**, « La science des voiles », nous réitérons les explications d'Arvel Gentry sur la circulation des écoulements autour des profils sans faire référence à son expérience de la baignoire. En fait, nous détaillons la circulation aérodynamique et, pour la première fois (au moins dans le domaine public), nous tentons de quantifier certains de ses effets (avec l'aide du Dr Michael Richelsen, directeur technique de North Sails et titulaire d'un doctorat en mathématiques de l'Université technique du Danemark). Pour comprendre le réglage des voiles, il est important de comprendre la théorie qui se cache derrière la pratique. Ce chapitre met l'accent sur le « miracle » de la navigation au près, rendu possible non pas par une portance élevée, mais par une faible traînée. Enfin, nous insistons sur le fait que la grand-voile et la voile d'avant ont une relation complémentaire, mais le foc sort clairement gagnant de cette dynamique. La voile est peut-être le « sport » de la météorologie, mais c'est aussi le « sport » de l'aérodynamique.

Le **chapitre 4** a pour titre « L'aérodynamique : de la théorie à la pratique ». En premier lieu, nous nous appuyons sur la théorie de l'aérodynamique étudiée dans le chapitre 3 pour établir un lien entre cette théorie et la relation qui existe entre la portance et la traînée. Cette partie nous mène aux différentes formes de traînées : celles qui sont substantielles et celles qui ne le sont pas. Puis nous explorons la corrélation entre l'aérodynamique et l'hydrodynamique et mettons en avant le concept d'équilibre du bateau, thème central des chapitres suivants relatifs au réglage des voiles.

Intitulé « Les voiles moulées en trois dimensions », le **chapitre 5** est le plus axé sur l'histoire de North. En 1990, l'entreprise avait déjà tout misé sur le 3DL, puis, en 2007, sur le 3Di. Ces paris ont indéniablement révolutionné l'industrie de la voilerie. Aujourd'hui, les voiles performance haut de gamme de North, qu'elles soient laminées comme le 3DL ou en composite comme le 3Di, sont construites d'un seul tenant, sur de grands moules mâles articulés et reconfigurables. On ne distingue plus le tissu de la voile. Ces deux éléments sont fabriqués simultanément ; ils sont indiscernables et indissociables. La fibre est déposée d'un coin à l'autre sans coutures ni raccords. Au risque de paraître quelque peu prétentieux, les voiles en 3DL et 3Di ont changé la donne dans le milieu de la voile, chez les amateurs comme chez les professionnels. North est la première voilerie au monde, et ce, depuis la fin des années soixante-dix. L'entreprise y est parvenue en faisant un choix fondamental il y a des années : faire cavalier seul dans le domaine des techniques des matériaux. Lorsque North Sails a décidé de créer North Cloth dans les années soixante-dix, les dés étaient jetés.

Katie Couric et Tom Whidden, Valence, Espagne. La célèbre journaliste et présentatrice télé américaine avait rapporté sur son blogue : « Un soir, j'ai donné un discours pendant mon séjour à Valence. À vrai dire, c'est Tom Whidden, président de North Sails et tacticien à bord de nombreux bateaux de la Coupe de l'America, qui me l'avait écrit. Je parlais du coefficient prismatique de la coque de *Team New Zealand* ; je suggérais qu'*Alinghi* ajoute plus de rond de guindant à leur grand-voile. Je ne suis toujours pas certaine d'avoir saisi le sens exact de mes propos, mais l'audience semblait trouver cela drôle. »

North était quasiment autonome, tandis que d'autres voileries continuaient à acheter leurs tissus à des fournisseurs appelés parfois « finisseurs ». Mais force est de constater que presque tous les finisseurs de tissus et les voileries ont été contraints de réagir face aux 3DL et 3Di. De même, tandis que le Dacron ou le polyester existent depuis près de soixante-quinze ans, North a été la première entreprise à réellement révolutionner ce matériau grâce à notre tissu appelé Radian : tissu orienté chaîne pour les voiles radiales.

Dans le **chapitre 6**, « La voile numérique », une nouvelle fois, avec l'aide de notre expert en aérodynamique le Dr Michael Richelsen, nous détaillons des codes de calcul tels que CFD, FEA, RANS et DES. Ce bal des sigles définit les méthodes les plus récentes et les plus efficaces dans l'analyse des formes volantes. Ceci est essentiel à plusieurs égards – et non des moindres –, comme ne pas gaspiller l'argent du client. La capacité de créer des données numériques est colossale. Un point clé dans ce contexte réfère au dicton « À données inexactes, résultats erronés ». Il importe alors qu'un designer compétent s'assure de la cohérence du modèle numérique avant de lancer l'analyse. Sans quoi le résultat serait pire que mieux.

Dans le **chapitre 7**, « La grand-voile », nous soulignons l'influence majeure de la grand-voile dans l'équilibre du bateau. Et nous nous concentrons sur le réglage d'un bateau moderne : gréement fractionné, grande grand-voile à corne, mât flexible, etc. Nous analysons également les raisons aérodynamiques pour lesquelles cette configuration est venue à prédominer sur les bateaux de compétition, mais aussi sur des unités de croisière récentes. Ce chapitre traite en profondeur du vrillage et de la raison pour laquelle il peut être précieux au régleur de voile.

Le **chapitre 8**, « Les voiles d'avant », se focalise sur le bord d'attaque du foc et le bord de fuite de la grand-voile. Ces deux éléments définissent le plan de voile par rapport au vent et la façon dont les régleurs, eux aussi, devraient l'appréhender. Cette perspective diffère de ce qui est communément compris ou discuté.

Le **dernier chapitre** est consacré aux « voiles de portant ». De toute évidence, la grande évolution est le changement rapide des voiles symétriques Spi au profit des voiles asymétriques Asy. Nous examinons également l'aérodynamique au portant, un sujet non abordé dans la première édition de ce livre. Nous expliquons comment les codes numériques sophistiqués s'adaptent davantage aux mouvements frénétiques des spinnakers légers, naviguant à des angles de navigation très différents du passé. Si l'on considère les voiles triangulaires comme une image ou une succession de photos sur un écran d'ordinateur, alors les spinnakers sont comme un long-métrage.

Mon métier, c'est la voilerie, et ma passion, la voile. J'ai passé toute ma vie à rendre des bateaux plus rapides, d'abord en tant que gamin qui a grandi dans ce sport, ensuite en tant que président de Sobstad Sails International, puis comme président de North Sails. Aujourd'hui, je suis président et PDG de North Technology Group auquel appartiennent North Sails, la plus grande voilerie au monde, Southern Spars, le plus grand fabricant de mâts au monde, Future Fibres Rigging Systems, la plus grande entreprise de gréements-composite au monde, Edgewater Boats, North Thin Ply Technology (NTPT), entreprise d'ingénierie composite au service entre autres de la Formule 1 (F1), et North Sportswear.

La voile a toujours été pour moi une histoire d'amour, la fascination de toute une vie qui m'a emmené très loin et, à bien des égards, plus vite que je n'aurais osé l'imaginer. Le métier de maître-voilier m'a permis de participer aux régates les plus excitantes et les plus incroyables : des sélections olympiques aux courses océaniques à travers le monde en passant par les championnats du monde de Maxi, les championnats du monde de séries et la prestigieuse Coupe de l'America. J'ai participé à huit campagnes de la Coupe avec Dennis Conner et nous en avons remporté trois : sur *Freedom* en 1980, *Stars & Stripes* en 1986-1987 et *Stars & Stripes 2*, le catamaran doté d'un mât-aile (le premier de ce type dans la Coupe de l'America), en 1988.

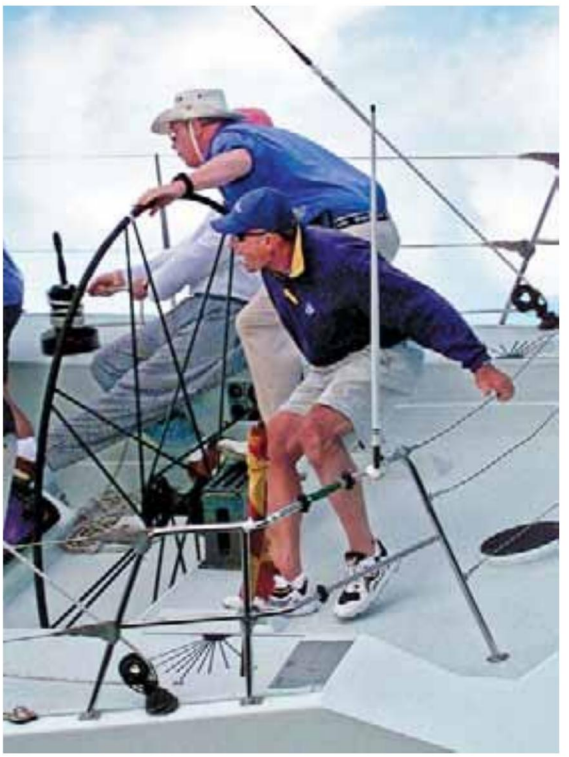
Grâce à la voile, à la voilerie et à la Coupe de l'America, j'ai eu l'honneur d'être invité à la Maison-Blanche à de nombreuses reprises, de défiler à la grande parade de la Cinquième

Spectre, un daysailer Germán Frers Jr. de 60 pieds (18,3 mètres), photographié lors de la régate Bicentenaire 2015 du Royal Yacht Squadron. Le yacht appartient à Peter Dubens, fondateur d'Oakley Capital Private Equity à Londres. Oakley Capital est désormais l'actionnaire principal de North Technology Group qui comprend North Sails, Southern Spars, Future Fibres Systems Rigging, Edgewater Bateaux, North Thin Ply Technology, et North Sportswear. (KOS Pictures.)

Avenue à Manhattan, de recevoir les clés de la ville de New York des mains du maire Ed Koch, et de participer régulièrement au show télévisé « The Today Show ». J'ai été intronisé au Hall of Fame de la Coupe de l'America, j'ai reçu un prix d'excellence pour l'ensemble de ma carrière dans la voile de la part de la Société Zegna, un prix pour contribution exceptionnelle dans le sport, décerné par Colby College ainsi que l'Université Club Man of the Year. Tout cela pour faire ce que j'aime, et je l'aurais fait de toute façon ! J'ai une chance inestimable, en effet.

J'ai également rencontré des gens fantastiques tout au long de mon parcours. Si un fabricant de voiles veut atteindre les sommets, il doit apprendre à fabriquer des voiles à la hauteur des critiques les plus exigeantes et les plus justes de ce sport. Des gens comme Dennis Conner et Jim Kilroy, par exemple, m'ont beaucoup influencé au début de ma carrière. Dennis Conner était Mr America's Cup, et Jim Kilroy, qui a fait campagne avec une série de Maxi yachts appelés *Kialoa*, était surnommé Mr Maxi Man. Ils représentaient l'ultime test dans ce sport. Si vous pouviez leur faire des voiles qu'ils appréciaient, utilisaient, et qui leur permettaient de gagner, vous étiez sûr de compter parmi l'élite. En cas d'échec, vous étiez mis sur le banc de touche. C'était un jeu risqué, mais cela représentait le meilleur terrain d'essai à l'époque.

Au cours des années suivantes, j'ai navigué avec de nombreux grands propriétaires de bateaux tout aussi exigeants. Beaucoup me viennent à l'esprit, mais ceux qui se démarquent incluent George David, George Coumantaros, Bill Koch, Lindsay Owen-Jones, Jim Clark, Charles Townsend, Luca Bassani, Neville Creighton, Arne Glimcher, Jes Staley et John Thomson, pour n'en citer que quelques-uns. J'en ai appris beaucoup plus sur la performance de haut niveau, la satisfaction des attentes, la gestion des relations humaines et des affaires, et sur la vie en général grâce à ces personnes qu'en lisant des livres durant toute une vie.



En haut : Terry Kohler, propriétaire principal de North de 1984 à 2014, sur son Santa Cruz 70 *Evolution* avec Tom Whidden à la tactique. (Photo North Sails, LLC.)

Ci-dessus, la construction de voiles 3DL sur un moule 3D à Minden dans le Nevada (États-Unis). La personne dans le harnais contrôle la dépose de fils pour s'assurer de leur alignement. Lorsque la tête de dépose change de direction, elle veille également à ce que les fils collent parfaitement sur la voile fabriquée en une seule pièce. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

J'ai eu également le privilège de m'associer à deux formidables partenaires au sein de North durant presque trente ans. Le premier était Terry Kohler. Après avoir volé à bord de bombardiers dans l'armée de l'air, il a obtenu son diplôme de premier cycle et d'études supérieures en trois ans à l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT). Inutile de mentionner qu'il était brillant. Il m'a aidé à bien des égards à développer un sens aigu des affaires et une capacité de prendre des décisions judicieuses. Il nous a donné les moyens de dépasser nos limites et d'atteindre nos objectifs plus vite que nous ne l'aurions fait sans lui, notamment dans le développement des nouvelles technologies. Son cursus à MIT lui a apporté non seulement l'expertise, mais aussi la confiance en soi. Ses paroles n'étaient jamais vaines, et ses décisions toujours justes.

À présent, mon partenaire est Peter Dubens, un homme d'affaires londonien accompli et très intelligent. Nous avons cherché un nouveau propriétaire ayant des compétences similaires à celles de Terry et qui serait prêt à poursuivre la vocation de North, à savoir investir dans la technologie et le personnel et envisager des acquisitions judicieuses pour assurer la viabilité de l'entreprise à long terme. En particulier, nous voulions regrouper tous nos sites dans une même structure de propriété. Peter est arrivé au bon moment. J'ai d'abord rejeté sa candidature lorsque l'un de ses partenaires m'a approché, tout simplement parce qu'ils étaient investisseurs financiers. Cependant, Peter n'a pas renoncé. Nous nous sommes rencontrés un après-midi d'été à Newport, dans l'État de Rhode Island, après avoir navigué. Nous avons immédiatement sympathisé. Je l'ai présenté à Terry Kohler, et tous les deux aussi se sont bien entendus. Il s'avère que Peter est un marin passionné ; il régate actuellement sur un étonnant plan Frers de 60 pieds (18 mètres) [photo page précédente]. Lui et son équipe, à Oakley Capital à Londres, ont permis à North de se développer dans de nombreux et divers domaines au cours de ces dernières années.

Un autre aspect qui fait de moi quelqu'un d'incroyablement chanceux est d'avoir été entouré de gens extraordinaires à North Sails. En plus de nos 45 ingénieurs diplômés au dernier décompte, je suis toujours impressionné par l'attitude de nos équipes totalisant près de 2 500 personnes à travers le monde : volontaires, innovantes, déterminées et qui n'hésitent pas à relever les manches. J'associe ces équipes à tous les succès que j'ai pu remporter.

Lorsque nous avons inventé le 3DL, la première réelle innovation dans la fabrication des voiles depuis 5 200 ans, notre équipe a inventé le concept, créé les logiciels pour concevoir et produire les voiles, et construit pratiquement chaque équipement nécessaire à la réalisation de la voile en membrane composite d'un seul tenant. L'équipe n'a cessé d'améliorer le produit pour finalement aboutir à une autre invention de voile moulée appelée le 3Di, le choix privilégié de voile aujourd'hui pour la plupart des voiliers haute performance et de croisière.

Ces exploits illustrent parfaitement l'attitude gagnante qui règne autour de moi. On ne laisse à personne d'autre le soin de contrôler notre destin. De longue date, ma stratégie a été d'investir dans la technologie et les talents. J'ai toujours voulu m'entourer des personnes les plus brillantes. Tant de gens ont contribué de manière exceptionnelle à North au cours de ces années. Nous évoquons nombre d'entre eux dans les pages suivantes, toutefois la liste est loin d'être exhaustive. Mais autant dire que North Sails doit son statut actuel à ce groupe unique de personnes incroyablement talentueuses, dynamiques et motivées.

Ted Hood, l'artiste, et North Lowell, le scientifique, sont à l'honneur dans le premier chapitre de cet ouvrage. Ces deux hommes ont fait basculer la technologie de la voilerie dans l'ère moderne. Enfant, je me nourrissais de récits sur leurs rivalités ;

jeune homme, je ne les ai que brièvement côtoyés, mais cela aura suffi à sceller mon destin de fabricant de voiles.

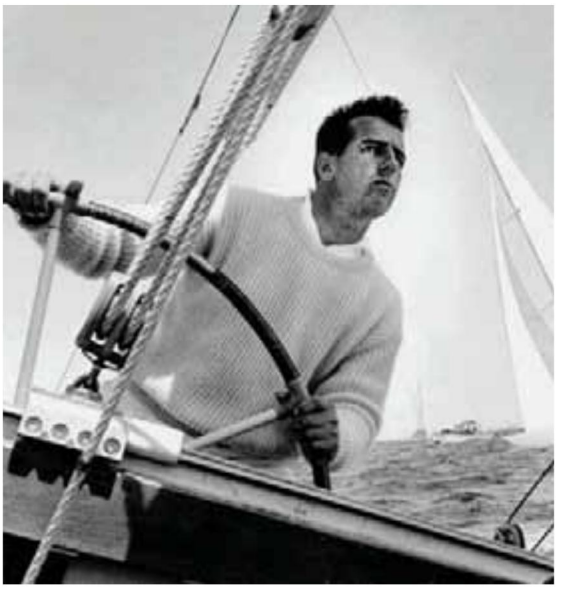
Parce que j'ai consacré mon existence à essayer de fabriquer de meilleures voiles, j'ai longuement réfléchi à ce conflit entre l'art et la science et à la façon dont il s'applique à la voilerie moderne. Avoir rencontré Hood et North m'a donné l'occasion de mettre en lumière leurs philosophies si contrastées.

C'est à l'âge de 10 ans que j'ai débuté dans la voile. Un ami dont les parents possédaient un chalet à Long Island Sound, près de Westport (dans le Connecticut), m'avait invité à naviguer. Et depuis ce premier après-midi en mer, j'ai régulièrement navigué avec Lenny Raymond. Ensemble, nous avons participé à quelques courses du Cedar Point Yacht Club. Nous étions plutôt doués, si je me souviens bien, même si ma plus grande source de plaisir était le sentiment de liberté et d'indépendance que l'enfant que j'étais ressentait sur l'eau, le sentiment de faire quelque chose par moi-même, quelque chose de compliqué, quelque chose qui impliquait un moyen de transport, quelque chose d'adulte.

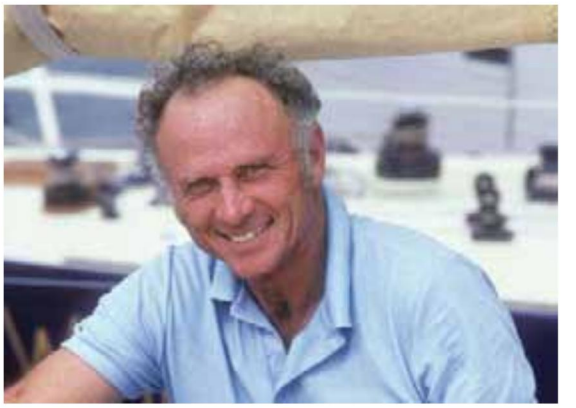
À 13 ans, mon père, directeur de publicité et lui-même marin accompli, m'a offert un vieux Blue Jay, un peu fatigué, que j'ai nommé *Rebound* (rebondir) pour des raisons évidentes. Même s'il avait été un peu malmené et n'était pas aussi rapide que certains des Blue Jays les plus enviables de mes amis, ce bateau m'a appris que lorsque l'on n'est pas rapide, mieux vaut être intelligent ou chanceux, voire les deux à la fois. Les gens que je fréquentais étaient fascinés par la voile, et nous nous sommes rapidement penchés sur la question : comment rendre les bateaux plus rapides ?

En 1961, à l'âge de 14 ans, j'étais convaincu de trois choses : je voulais être un fabricant de voiles, je voulais participer aux Jeux olympiques et je voulais naviguer pour la Coupe de l'America. Au cours de la même année, j'ai acheté un jeu de voiles North pour mon Blue Jay. À cette époque, North Sails était une société située sur la côte ouest, mais la réputation de son directeur Lowell North s'étendait à l'international dans le monde de la voile. J'aime à penser que j'étais le premier marin de Long Island Sound à avoir acheté un jeu de voiles North. J'ai appelé le bureau à San Diego, et j'ai demandé à parler à Lowell North. Pour un adolescent de 14 ans complètement accroc à la voile, ce coup de fil à l'autre bout du pays était un peu comme passer un appel au joueur de baseball Mickey Mantle ou aux joueurs plus contemporains tels que Roger Federer dans le tennis ou Cristiano Ronaldo dans le football. Quand le secrétaire m'a passé Lowell North, je lui ai demandé d'une voix incertaine s'il avait déjà fait des voiles de Blue Jay. « Pas beaucoup », m'a-t-il répondu. Je lui ai confié que j'avais eu de bons échos sur ses voiles, en particulier dans le vent léger, conditions que nous rencontrons souvent ici à Long Island Sound. Il m'a dit qu'il appréciait mes paroles aimables et serait heureux de me faire des voiles. Et elles sont arrivées. Elles n'étaient pas parfaites à tout point de vue, mais elles fonctionnaient sacrément bien. Après leur achat, j'ai affiché d'honorables résultats à bord de mon Blue Jay.

Puis à 17 ans, j'ai enseigné la voile au Wianno Yacht Club d'Osterville, à Cape Cod. Là-bas, les gens étaient encore plus accrocs à la voile que mes copains d'enfance. J'ai appris à bien connaître Jack Fallon, un promoteur immobilier. Fallon naviguait sur un Wianno Senior, un gréement à cornes de 25 pieds, sur lequel les frères Kennedy, Jack, Bobby et Ted, ont également navigué. J'ai parlé à Fallon de mon rêve de participer à la Coupe de l'America. Il se trouvait qu'il connaissait Ted Hood qui, au cours de cette période, préparait le 12M J.I. *Nefertiti*, un bateau de sa conception, pour la Coupe de l'America de 1964. Fallon m'a emmené à bord de ce voilier, qui avait échoué dans sa première quête du trophée prestigieux en 1962. On m'avait mis à la colonne de winch. Je me souviens que je peinais à m'accrocher aux manivelles qui tournaient à une vitesse folle en face d'un colosse à la carrure d'un joueur de ligne de football américain. Il moulinait avec une force telle qu'il semblait pouvoir déplacer des montagnes, et à plus forte raison le point d'écoute de génois. Pour un adolescent émerveillé par le plus beau jour de sa vie, le 12M J.I. semblait naviguer à un million de kilomètres à l'heure. Aussi,



Ted Hood (Avec l'aimable autorisation de la famille Hood.)



Lowell North (Photo North Sails Group, LLC.)

En octobre 2015, *Phaedo*[3] skippé par Lloyd Thornburg et Brian Thompson, a établi trois records du monde en une semaine – ce qui en soi est un record. Le trimaran MOD 70 a réalisé plusieurs records ratifiés par le World Sailing Speed Record Council (WSSRC) : parcours de la Fastnet en 27 heures et 42 minutes (sur une distance de 594 milles nautiques à la vitesse moyenne de 21,48 nœuds) ; entre Plymouth et La Rochelle, en 14 heures et 5 minutes (329 milles nautiques à la vitesse moyenne de 23,36 nœuds), et entre Cowes et Dinard, 4 heures et 48 minutes (138 milles nautiques pour une vitesse moyenne de 28,66 nœuds). Les MOD 70 étaient une classe de trimarans monotypes construits en France il y a quelques années. Le jeu de voiles de ce MOD 70 est composé de voiles 3DL et 3Di. La grand-voile est une 3DL TF 2 (c'est-à-dire recouverte d'un film taffetas de chaque côté qui protège la voile des frottements et améliore sa longévité). Le génois est une voile 3Di Raw, tout comme la trinquette. C'est une voile standard pour les allures de bon plein sur ce type de voilier, comme tout bateau rapide. La trinquette est établie entre le génois et la grand-voile, améliorant la performance de ces deux voiles. *Phaedo*[3] s'est aussi imposé sur la Rolex Middle Sea Race en 2015, événement où a été prise cette photo. (Photo Carlo Borlenghi/Rolex.)

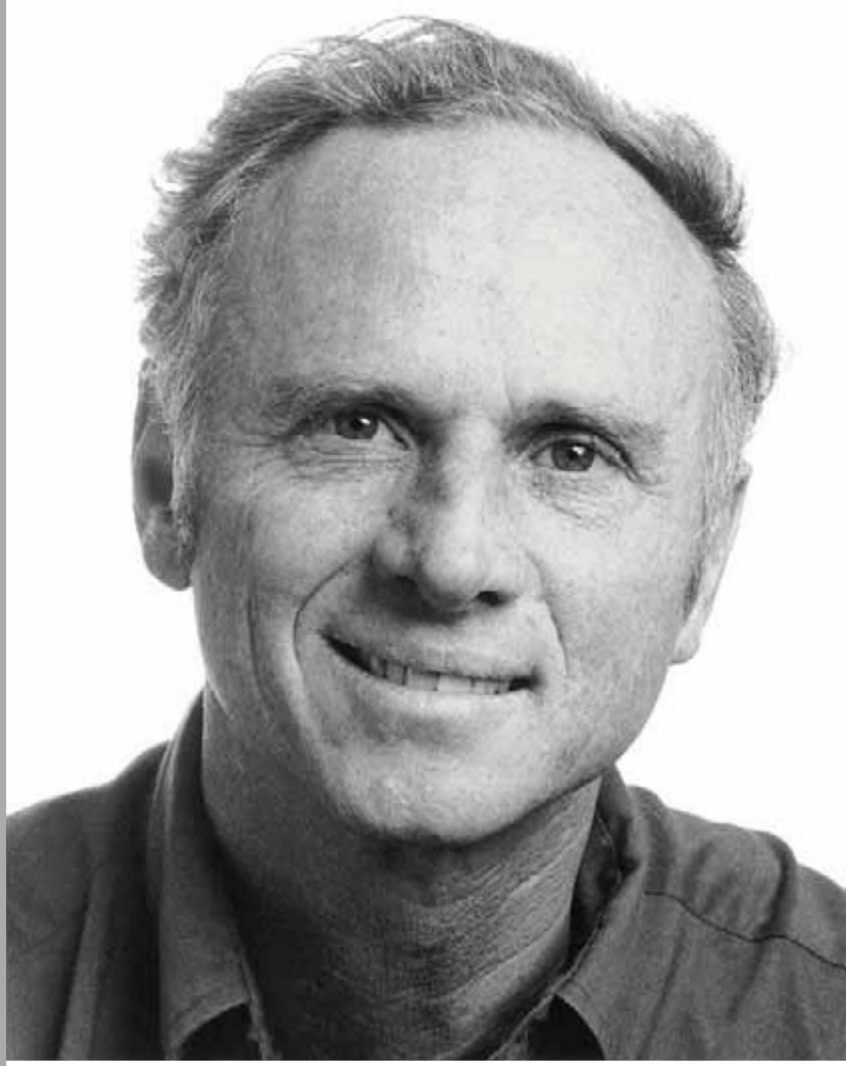
chaque fois que je pouvais, je jetais un regard furtif à Hood dans le cockpit. J'étais impressionné par son calme. Hood n'a pas dit plus de cinq mots de la journée. Il passait tout son temps à observer les voiles. Il prenait beaucoup de notes ; il en a même griffonné quelques-unes sur les voiles. Si, à l'époque, je ne saisissais pas exactement le sens de ses actes, aujourd'hui, je le comprends. Hood avait un œil extraordinaire pour analyser la forme d'une voile. Pour lui, le métier de maître-voilier consistait à couper la voile sur le plancher le plus justement possible, puis à sortir en mer pour vérifier ce qui allait ou ce qui n'allait pas. Ensuite, il retaillait la voile. Ses dessins au crayon lui permettaient de marquer les zones en tension qu'il fallait relâcher et celles trop lâches qu'il fallait repincer. C'était une approche très empirique de mise en forme des voiles. Ce jour-là, Hood m'a marqué à jamais. Étant jeune et totalement étranger à ce niveau-là du jeu, j'étais captivé par toute cette expérience. Encore maintenant, je reconnais que Hood était le plus grand des maîtres. Ce jour a forgé mon destin plus que n'importe quel autre.

Quelques années plus tard, alors que j'aidais Dennis Conner à s'entraîner pour la Coupe de l'America de 1980, j'ai eu l'occasion de naviguer avec Lowell North sur le 12M J.I. *Enterprise*. Ce fut une expérience très différente. North observait les voiles tout comme Hood, et il avait évidemment des idées sur les changements qu'il pouvait apporter. Mais il n'a rien fait avant de consulter la fiche de découpe sur l'ordinateur. S'il ne pouvait pas faire le lien entre ses observations sur une voile particulière et les données informatiques, le processus ne l'aidait pas. Il aurait pu améliorer la voile en question, mais la méthode ne bénéficiait à aucune autre voile et ne lui permettait pas de développer sa base de données ni celle de sa compagnie. Cette même semaine, Ted Hood a navigué avec nous à bord d'*Enterprise*. Il barrait le bateau magnifiquement au près, mieux que personne. Il voyait juste ; il naviguait toujours plus haut que ce que je pensais être possible. Il a émis environ quatre remarques en tout et pour tout pendant cette journée. Des commentaires sur les voiles. J'avais observé les voiles tout l'été, et les observations de Hood ne m'avaient jamais traversé l'esprit. Je me suis rendu compte, alors, qu'il avait beaucoup plus qu'une grande expérience. Il avait aussi beaucoup d'idées. Elles lui venaient naturellement comme s'il avait la science infuse. C'est peut-être ce qu'on peut raisonnablement appeler un génie.

North, à l'opposé, était toujours à l'affût d'idées. C'était un savant sur un voilier. Certaines de ses idées étaient brillantes, mais beaucoup étaient si décalées qu'elles me stupéfiaient. Pourtant, je me suis aperçu que North et Hood avaient probablement raison chacun à leur manière, fidèles à eux-mêmes et fidèles à leur époque. La voile a énormément bénéficié de leurs différences et de leurs parcours aussi divergents. Il est probable que cette distance entre eux soit à l'origine de la diversité technologique qui caractérise la voile en tant que sport et industrie aujourd'hui. Hood et North ont marqué de leurs empreintes non seulement les entreprises qui portent leurs noms, mais aussi l'ensemble de l'industrie.

Tournons la page et commençons notre voyage avec Ted Hood et Lowell North – là où le mien a commencé. N'oublions pas de mentionner que mon coauteur, Michael Levitt, a également coécrit l'ouvrage sur *Ted Hood, Through Hand and Eye* (Mystic Seaport). Vous êtes donc entre de bonnes mains.

TED HOOD



LOWELL NORTH

L'artiste et le scientifique

La technologie de pointe des voiles modernes doit beaucoup à deux hommes qui se sont affrontés farouchement dans les affaires comme sur les plans d'eau durant de nombreuses années. Ce sont Ted Hood et Lowell North, deux personnalités contrastées à l'image des villes de Marblehead (Massachusetts) et San Diego (Californie).

Ted Hood, de taille imposante et à l'allure sans prétention, a commencé à fabriquer des voiles en 1952. L'homme dont les voiles équipaient les bateaux defenders de la Coupe de l'America entre 1958 et 1977, et qui en a été le skipper victorieux en 1974, avait le langage mesuré d'un Yankee. Le Hall of Fame de la Coupe de l'America le décrit comme « le marin de la Coupe de l'America le plus discret ». Son introversion était compensée par son sens de l'observation et son coup de ciseau inégalés, et sans doute inégalables, dans le milieu. Si la voile est un art, alors Hood, qui est décédé en 2013, était son Michel-Ange.

Lowell North, plutôt grand et mince, a entamé sa carrière dans la fabrication de voiles en 1959. C'était un homme d'avenir qui bouillonnait de créativité, parfois d'une extrême justesse, parfois décalée. Ingénieur de formation, il croit avec ferveur au dogme du progrès. Toujours à l'affût de l'idée miraculeuse, North est un fervent partisan de la culture californienne typiquement tournée vers l'innovation.

Détenteur de médailles olympiques d'or et de bronze, et vainqueur à quatre reprises des championnats du monde de Star, North éprouve une défiance profonde envers l'art, ou la conception intuitive des voiles. Il n'a jamais porté d'intérêt à l'aspect esthétique des voiles, seulement aux facteurs tangibles de performance. Alors, pour fabriquer des voiles, il s'est tourné vers des données quantifiables : le métier de voilier, étayé par une méthodologie scientifique rigoureuse.

Tôt dans sa carrière, il a identifié que si le dessin d'une voile ne pouvait être répliqué, il ne pouvait être ni amélioré ni partagé avec quiconque au sein de l'entreprise pour favoriser une synergie créative. Du fait de sa prédilection pour les chiffres et le partage d'informations, North a adopté l'ordinateur pour fabriquer des voiles, un outil relativement obscur et coûteux à l'époque. Si la voilerie est une science pointue, Lowell North est son Steve Jobs.

Dans le contexte actuel de la conception numérique et du procédé de thermoformage des voiles, que ce soit le 3DL (voiles laminées) ou le 3Di (voiles composites), cette guerre des mondes, cette bataille entre le scientifique et l'artiste nous semble être un combat injuste. En réalité, il aura fallu à North et à ses disciples – les fabricants de voiles de toutes les autres voileries qui ont emprunté la même voie – plus de deux décennies pour gagner la bataille contre Ted Hood, tellement celui-ci était redoutable. Leur combat était le choc des titans dans le monde de la voilerie.

Des quatre coins du pays et dans un camp comme dans l'autre, cette compétition, qui a duré vingt-deux ans entre ces deux hommes aux antipodes l'un de l'autre, a précipité la voilerie dans une nouvelle ère qu'elle n'aurait peut-être pas atteinte aussi rapidement, voire pas du tout, si leur conflit n'avait pas été aussi féroce.

L'industrie de la voilerie n'a jamais été de taille suffisante pour promouvoir l'innovation dans l'utilisation des matériaux. Elle a plutôt emprunté la technologie des matériaux existante. Pourtant, le polyester, le Mylar et les fibres d'aramides doivent leur degré de sophistication actuelle à la concurrence impitoyable entre ces deux fabricants de voiles, et d'autres également. Le secteur de la voilerie reste aujourd'hui un leader sur le marché dans l'application du carbone, Spectra/Dyneema, et dans une moindre mesure du Dacron/polyester.

Ted Hood (Avec l'aimable autorisation de la famille Hood.)

L'artiste

L'artiste Ted Hood n'était peut-être qu'un petit entrepreneur, mais il a marqué de son sceau la ville de Marblehead, un centre nautique à l'image de Newport (État de Rhode Island) où il s'installera plus tard. Avant son départ de Marblehead, onze générations de Hood ont vécu et travaillé sur cette rive nord du Massachusetts. C'était une famille d'innovateurs à tout point de vue. Trois générations de Hood ont habité la maison située à Danvers, au nord-est de Marblehead, où Ted Hood et son jeune frère, Bruce, ont passé leurs années formatrices. Le père de Hood, Ralph Stedman Hood, surnommé « le Professeur » en raison de son côté distrait quand bien même il avait enseigné dans un collège du Midwest pendant quelques années, travaillait pour Monsanto Chemical Corporation dans les environs d'Everett et comptait de nombreux brevets à son actif dans l'électronique.

Le grand-père de Hood, Ralph O. Hood, inventa le démarreur électrique qu'il vendit à General Electric pour la somme de 75 000 dollars, une véritable fortune à l'aube du siècle dernier. Il investit ce pécule pour construire la Hoodmobile, une berline à quatre places. Il en fabriqua six puis, comme tant d'autres qui rêvaient de motoriser la population américaine, il fit faillite. Ted se souvenait qu'en rentrant de l'école il travaillait avec son grand-père dans l'atelier de la cave : « Mon grand-père était toujours à la maison. Après l'école, nous descendions au sous-sol pour travailler sur un de ses projets, et il nous apprenait comment faire. Je pense que ces moments privilégiés font défaut aujourd'hui parce que les familles ne vivent plus ensemble. »

Hood n'a pas grandi dans l'opulence, mais sa famille a toujours possédé des bateaux. Il se rappelait le vieux R-boat sur lequel ils régataient à Marblehead, son père à la barre et son grand-père aux réglages du spi. Alors âgé de 7 ans, Ted essayait désespérément de se faire oublier tandis que les deux adultes débattaient vivement du réglage des voiles. Ils ne jouaient pas les places d'honneur, se souvenait Hood, sort qu'il attribuait à leurs mauvaises voiles. À 9 ans, il les retailla, puis en fabriqua de nouvelles pour son premier bateau.

Dans un petit ouvrage de bibliothèque sur la confection des voiles, il apprit qu'il existait fondamentalement deux façons de conférer une forme aérodynamique tridimensionnelle à un morceau de tissu bidimensionnel. La méthode la plus simple pour donner du volume à une voile triangulaire est de couper les bords de la voile connectés

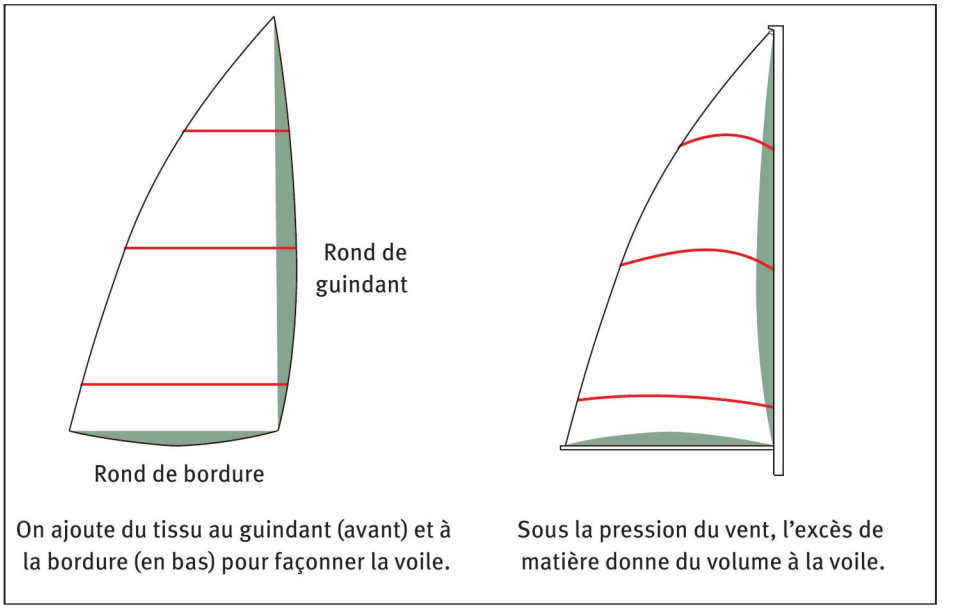


Figure 1.1 Mise en forme d'une voile avec ronds de guindant et de bordure.

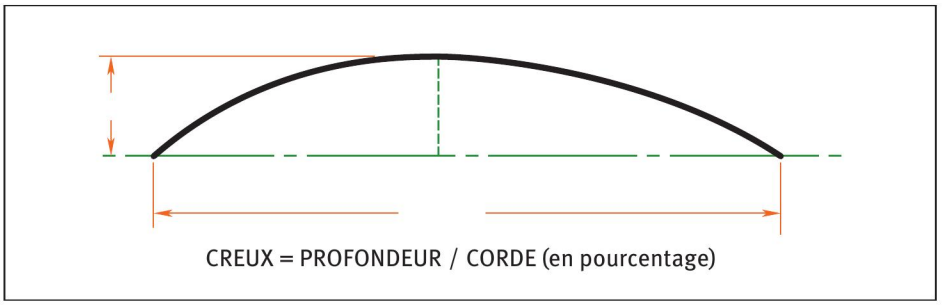


Figure 1.2 Méthode de calcul de profondeur de voile.

à un support (mât, bôme ou étai) en une courbe positive. Par exemple, un maître-voilier pourrait commencer par tailler le guindant d'une voile, que l'on désigne par courbe de guindant (fig. 1.1). Ensuite, lorsque le guindant de la voile est fixé à un mât droit, l'excès de matière (le rond de guindant) pousse le volume dans la voile[1].

De sa première expérience de mise en forme de voile, Hood racontait : « Je ne créais pas de laizes courbes dans mes voiles (pinces), mais je taillais un rond de guindant et un rond de bordure. Je tendais un bout le long des bords pour plisser le tissu et induire du creux. » Le degré de mise en forme dans une voile est déterminé par son creux. Dans une certaine mesure, plus le creux est substantiel, plus la puissance est importante, et moins on a de creux, moins on a de puissance.

Le creux d'une voile est établi en traçant une ligne horizontale imaginaire du guindant à la chute. Cette ligne est appelée la corde (fig. 1.2). Comme vous le verrez par la suite, les voiles à panneaux de coupe radiale ainsi que les voiles 3DL et 3Di ont des bandes horizontales de couleur pour mieux visualiser le creux.

Sur une voile d'une section transversale donnée, le creux est déterminé par la mesure de la corde au point le plus profond de la voile ; c'est le point de creux maximal. Le creux de la voile correspond alors au rapport creux/corde exprimé en pourcentage. Ainsi, un creux de 0,3 mètre pour une corde de 3 mètres est défini comme un creux de 10 pour cent. Ce nombre indique le creux de la voile relatif à sa largeur sur cette section particulière (horizontale). Une voile avec un creux de 8 pour cent est considérée comme assez plate et efficace dans la brise, comme nous le verrons. Une voile qui possède 15 à 16 pour cent de creux (c'est-à-dire 0,4 mètre de profondeur sur 3 mètres d'envergure) est volumineuse et peut être adaptée au vent léger quand on cherche à avoir plus de puissance. C'était à partir de leçons simples comme celles-ci, tirées d'un vieux livre de bibliothèque, que le petit Ted Hood fit ses premières armes.

La voile a toujours dominé son existence, et ce, depuis son adolescence. Naviguer était ce qu'il faisait de mieux et ce qu'il désirait faire par-dessus tout. Mais, à la fin de la Seconde Guerre mondiale, après une période de service militaire pénible dans la marine où il passa notamment son temps à peindre un remorqueur à Washington (District de Columbia), il se détourna de la mer pour entamer une nouvelle carrière. De retour de la marine, il termina sa dernière année de lycée, puis intégra Wentworth Institute, une école d'ingénieurs à Boston, pour étudier l'architecture et le génie civil. Étudiant, il contribuait aux besoins de sa famille en réparant des voiles. Il mit à profit toutes les opportunités. Plutôt que simplement réparer les voiles, il les améliorait souvent à la demande des clients du coin. Et parfois même de son propre chef. Il rallongeait, par exemple, la ralingue d'une grand-voile, donnant à la voile une forme plus volumineuse ; ou au contraire, il la raccourcissait. Si une voile nécessitait une retouche majeure, il démontait les coutures et

1 Si toutefois le mât est cintré, la courbe du mât correspond plus étroitement à la courbe de guindant de la voile, et on aplatit la voile. Ceci explique pourquoi les marins cintrent volontairement le mât pour aplatir une voile (au près dans des vents modérés ou forts) ou ils le redressent pour avoir plus de volume (temps léger, allures de largue ou sous le vent).

modifiait les pinces et donc la forme (de la voile). Hood apprit de manière empirique, une méthode qui allait faire son succès.

Hood commença sa carrière dans la voilerie à un moment propice. L'industrie traversait de vastes changements dans les années cinquante à la suite de l'introduction de nouveaux tissus perfectionnés au cours des années de guerre, comme le nylon, l'Orlon, et, en 1953, le Dacron ou le polyester, qui remplaçaient les voiles en coton, la fibre traditionnelle depuis un siècle.

Avant Hood, le premier fabricant de voiles dans le Nord, et sans doute dans tout le pays, était Ernest A. Ratsey, un descendant du célèbre George Ratsey, lui-même fondateur d'une entreprise de voilerie en 1790 sur l'île de Wight en Angleterre. C'était une boulingue (petite voile du haut du mât) signée George Ratsey que Lord Nelson utilisa lors de sa victoire en 1805 à la bataille de Trafalgar.

Ernest A. Ratsey s'installa aux États-Unis en 1902 avec son père George Ernest Ratsey. Les cinquième et sixième générations de cette famille distinguée de fabricants de voiles fondèrent Ratsey & Lapthorn à City Island, dans le quartier du Bronx à New York. La maison allait surtout bâtir sa réputation en fabriquant les voiles des bateaux de la Coupe de l'America. Pendant les années trente, la plupart des Classe J américains de la Coupe étaient équipés de voiles Ratsey. Le commerce des Ratsey prospéra notamment grâce au développement de tissus de meilleure qualité dans la première moitié du XX^{e} siècle, comme ce fut le cas pour Ted Hood dans la seconde moitié.

Les Ratsey introduisirent le coton égyptien à longues fibres qui s'étirait moins que le coton d'Amérique, la toile ou le lin. D'ailleurs, la qualité des voiles en coton égyptien s'était nettement améliorée. Malgré tout, ces voiles, comme toute voile en coton, étaient extrêmement sensibles à l'humidité. Elles avaient aussi tendance à moisir et à pourrir, et nécessitaient un temps de rodage. Des défauts qui constituaient le talon d'Achille de ce matériau[2].

Ernest Ratsey était également célèbre pour ses manuscrits dans lesquels il détaillait presque toutes les voiles fabriquées par son entreprise. De nos jours, on les qualifierait de bases de données. Certes, l'art de la voilerie évoluait en ces temps-là, néanmoins les progrès étaient lents. Comme Ratsey l'écrivait dans *Yacht Sails, Their Care and Handling*, l'ouvrage qu'il rédigea avec W. H. de Fontaine, « la voilerie reste un art qui se transmet de génération en génération ».

Après la guerre, le coton égyptien vint à manquer, cependant les fibres synthétiques telles que le nylon, l'Orlon et le Dacron firent leur apparition sur le marché. Le nylon, contraction formée à partir du nom des villes de New York et Londres où la recherche sur la fibre avait été réalisée, était le premier de ces nouveaux matériaux utilisés. Dans sa forme initiale, le nylon employé en voilerie connut des problèmes de déchirure, d'allongement et d'absorption d'eau, mais qui furent résolus au fil des années. Aujourd'hui, le nylon est encore utilisé pour les voiles de portant telles que les spinnakers. L'Orlon, le second matériau apparu en voilerie, ne pouvait être tissé que dans un tissu léger (entre 3,8 oz [162 g/m^2] et 5 oz [214 g/m^2]). Son application était alors limitée à de petites voiles de dériveurs. Le Dacron, inventé en 1941 en Angleterre par J. R. Whinfield et J. T. Dickson, était un produit dérivé du raffinement du pétrole. En 1945, la firme DuPont acheta à ICI Fibres, une entreprise basée en Angleterre, les droits de ce qu'on appelait à l'époque le Tergal – mais il faudra attendre huit ans avant de le voir appliqué à la voilerie. DuPont le nomma Dacron ; son nom générique est polyester.

Dès le début, Hood et son père réalisèrent que le matériau serait la clé pour produire de meilleures voiles. « Nous avons conclu, déclarait Hood, que la plus grande variable dans la fabrication de voiles était le tissu. Il s'étirait différemment, ce qui changeait tout. J'en déduisais donc que disposer d'un bon tissu était la solution pour réaliser de bonnes voiles de manière constante. Car si on peut prédire le comportement du matériau, on peut alors contrôler le procédé de fabrication et donc la forme des voiles. » Plutôt que d'acheter des quantités importantes de tissus aux fournisseurs principaux tels que Howe

2 Le Dacron ne doit pas son succès dans la voilerie à ses propriétés de résistance à l'allongement, à sa grande solidité et à sa finition lisse. Son avènement tient plutôt de sa résistance à la détérioration. Ses autres propriétés ont été découvertes a posteriori.

& Bainbridge (désormais appelé Bainbridge International) ou Lamport, Hood et son père décidèrent de fabriquer leur propre tissu[3].

En 1952, ils achetèrent quatre métiers à tisser pour taies d'oreiller à Pequot Mills, une fabrique de textile établie à Salem (Massachusetts), et les transférèrent dans une voilerie à Marblehead. Le Professeur, qui par son travail sur la fibre à Monsanto connaissait bien le processus de tissage et de finition du tissu, s'essaya au tissage de l'Orlon, puis du Dacron en 1953. Hood fut non seulement le premier à réaliser des voiles en Dacron – mais personne ne parviendra à égaler sa maîtrise au cours des vingt-cinq années suivantes. Lui et son père tissaient le Dacron de manière plus serrée que tout autre fabricant de tissu de voiles. Sur leurs métiers à tisser, ils tissaient la toile sur des largeurs de 50 centimètres (le tissu commercial pour les voiles mesurait le plus souvent 91 ou 71 centimètres). Ensuite, le père Hood appliquait un traitement thermique sous pression à l'aide de calandres chaudes. La chaleur contractait le matériau jusqu'à 45 centimètres de largeur et la calandre, semblable à une vieille essoreuse à linge, écrasait les fils en les resserrant davantage. Enfin, après lavage, le tissu était traité dans un bain de silicate (un matériau blanc comparable au micro-ballon) qui augmentait le frottement entre les filaments et les fibres. Cette dernière étape conférait à la matière un « effet antidérapant », comme le décrivait Hood. Il s'agissait de « la solution secrète », confia-t-il des années plus tard à Michael Levitt, coauteur de ce livre et de l'ouvrage *Ted Hood Through Hand and Eye*.

Les voiles conçues avec les tissus Hood étaient visuellement différentes. Comme elles étaient fabriquées à partir de panneaux de tissus de 45 centimètres de large, elles avaient deux plus fois de laizes que celles réalisées avec des panneaux conventionnels de 91 centimètres. Et comme une grande partie de la forme de la voile est déterminée par les pinces, Hood disposait d'une meilleure résolution pour contrôler la forme[4]. Il en résultait une forme plus lisse. Les voiles de Hood avaient une couleur particulière. Elles étaient d'une légère teinte jaunâtre, causée par la réaction du Dacron à la chaleur des calandres, du bain de silicate et du fil à coudre de couleur brune propre à Hood. Ce fil était connu sous le nom de « fil Teddy Brown de Marblehead », se rappelait Hood. Ses voiles avaient également un toucher plus doux, comme le traditionnel coton qu'elles avaient remplacé. Par-dessus tout, grâce aux voiles en Dacron façonnées par l'œil expert de Ted Hood, les régatiers et Hood lui-même gagnaient des courses du début à la fin. Ces exploits finirent par attirer de plus en plus de clients de Marblehead, puis du Nord-Est des États-Unis, de tout le pays, et finalement du monde entier.

Pendant longtemps, Hood Sailmakers fut la plus grande voilerie au monde. La légende de Hood serait gravée dans le marbre de la Coupe de l'America.

Dans le premier défi d'après-guerre de 1958, le célèbre Emil « Bus » Mosbacher, qui allait plus tard travailler pour le président Richard Nixon et devenir commodore du New York Yacht Club, convia Ted Hood, alors âgé de 34 ans, à rejoindre l'équipage du voilier *Vim*, construit douze ans plus tôt, et à apporter quelques-unes de ses voiles. Trois nouveaux 12M américains concourraient cette année, mais les stars de l'été étaient le vieux *Vim* et le tout nouveau *Columbia*. La régate était si serrée entre ces deux bateaux, dessinés par Olin Stephens, que le Comité de course du New York Yacht Club était incapable de se prononcer sur le defender. Finalement, dans une ultime épreuve décisive, *Columbia* battit *Vim* d'une courte longueur de bateau. Au cours des régates éliminatoires de la Coupe de l'America,

3 Un autre pionnier des voiles en Dacron était Sol Lamport, un fabricant de voiles américain, qui introduisit en 1955 un produit appelé Plysail. La fabrication de ce tissu consistait à coller l'un sur l'autre deux tissus légers de Dacron, une méthode qui préfigurait le procédé de lamination des tissus à voile, encore courant aujourd'hui. Cependant, le collage posait problème et, après l'échec de Plysail, Lamport introduisit Drysail, un matériau utilisé avec succès sur les voiles de *Hootman*, bateau de course océanique, et sur le 12M *Columbia*, defender de la Coupe de l'America de 1958. *Vim*, principal concurrent de *Columbia* dans ce premier défi d'après-guerre, arborait des voiles Dacron fabriquées par Hood.

4 Les panneaux de tissus Dacron de 50 centimètres de largeur fabriqués par les finisseurs industriels étaient principalement réservés aux grammages élevés.

Ted Hood dans la voilerie de Marblehead, MA. (Gracieuseté de la famille Hood.)

Columbia fit bon usage des spinnakers crosscut brevetés par Hood et prêtés par l'équipage *Vim*. Face à *Sceptre*, le 12M britannique *Columbia* remporta quatre courses consécutives avec une avance moyenne de 8 minutes. C'était un bon coup de projecteur pour Hood. La quasi-victoire de *Vim* ne pouvait être attribuée à la conception du voilier puisqu'il était vieux de douze ans. Les mérites revenaient plutôt aux compétences logistiques de Mosbacher et au talent de Hood avec les voiles. L'été passé, Hood fut alors connu sous le nom de « Fabricant des voiles des 12M (de la Coupe de l'America) », titre attribué par le magazine *Yachting* et qu'il conservera durant vingt-deux ans. Plus tard, le magazine *New Yorker* (16 août 1967) lui consacrera un portrait de 12 000 mots intitulé tout simplement « Le Fabricant de voiles ».

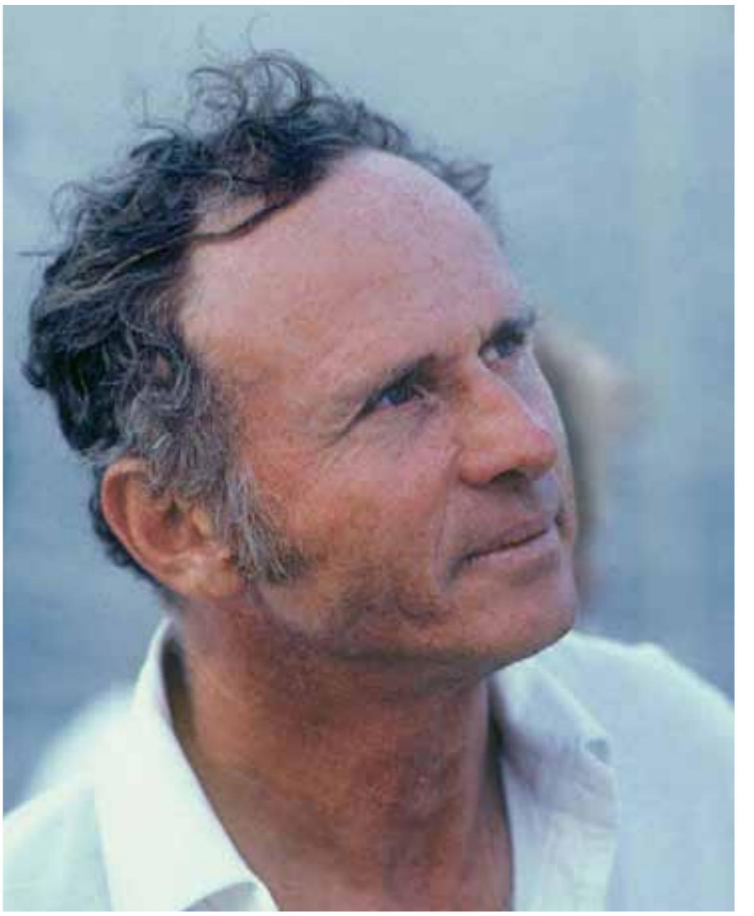
Weatherly, *Constellation* et *Intrepid*, defenders victorieux de la Coupe de l'America respectivement en 1962, 1964 et 1967-1970, arboraient des voiles Hood. En 1970, *Gretel II*, le challenger australien opposé à *Intrepid*, gagna une épreuve en utilisant des voiles fabriquées par Ted Hood. Les voiles Hood propulsèrent aussi *Courageous* dans ses défenses victorieuses en 1974 et 1977. Les règles de la compétition furent ensuite amendées pour interdire aux concurrents étrangers d'utiliser des tissus fabriqués aux États-Unis[5].

Hood finit par vendre sa société Hood Sailmakers, alors devenue la plus grande voilerie au monde dans les années soixante-dix, avant de la racheter, puis de la vendre à nouveau. À ce jour, la compagnie existe toujours. Après trente ans passés à Marblehead, Hood décida de s'installer à Portsmouth (Rhode Island) pour y construire une importante marina sur les rives de la baie de Narragansett. Il y établit également une société de construction navale appelée Little Harbor Yachts. Ces deux activités connurent un succès florissant. Désormais, elles sont détenues et gérées par la compagnie Hinckley.

La ville de Marblehead survivrait-elle sans Hood Sailmakers, sans Ted Hood ? Bill Purdin, journaliste au magazine de Marblehead, émit ce commentaire : « C'est peut-être l'individu qui a le plus contribué à bâtir la réputation de Marblehead en tant que *Capitale américaine du yachting*, Ted Hood est toujours sur le devant de la scène nautique internationale... En 1965, il annonça un plan de développement de la plage de Riverhead en un port de plaisance de classe mondiale, sans aucuns frais pour la ville. Son projet fut contesté avec la plus grande véhémence et subit une défaite humiliante à l'assemblée municipale. Par la suite, le fils préféré de Marblehead vendit toutes ses infrastructures nautiques à la ville. Il transféra sa base d'opération à Rhode Island où ses initiatives furent favorablement accueillies, et où ses entreprises ne cessèrent de croître et de s'affirmer dans le monde du yachting. L'industrie de Marblehead connut une période de stagnation économique sévère et, peut-être finalement, la résistance de la ville aux plans de Ted réduisit ce qui fut autrefois le centre de régates de renommée mondiale à une zone de mouillage pour embarcations de plaisance saisonnières et régates amicales à la journée. »

5 Cette règle fut à nouveau modifiée en 1983, lorsque les responsables de la jauge du New York Yacht Club ont reconnu que la voilerie s'était mondialisée.

Le scientifique



Lowell North (Photo North Sails, LLC.)

Le scientifique Lowell North, de deux ans le cadet de Ted Hood, est né en 1929 à Springfield dans l'État du Missouri. Le père de North était un géophysicien spécialisé dans le pétrole. Il localisait l'or noir dans pratiquement chaque petite ville poussiéreuse de Californie, de Bakersfield à Stockton. Au dixième anniversaire de Lowell, la famille déménagea à Los Angeles, et son père acheta un bateau à moteur de 36 pieds qu'ils utilisaient, lui et son fils, pour la pêche. Le bateau à moteur était muni d'une barque de 8 pieds qui servait d'annexe et que North s'appropria pour son propre usage. Tout comme Hood, le jeune North entreprit de retaper ce bateau et il lui fabriqua une voile. « J'ai construit un mât pour le canot, et j'y ai ajouté une quille d'environ 45 kilos », relatait North. « Une sorte de quille en acier. J'ai fait une voile pour ce bateau. Sûrement la pire voile au monde. Le bateau parvenait à peine à remonter au vent. Ça n'était vraiment pas terrible. » Une partie du problème était liée à la conception, l'autre venait du manque d'expérience du jeune garçon en voile. North affina ses compétences sur des bateaux de location à Newport Beach, à 80 kilomètres au sud de Los Angeles. Finalement, son père lui offrit un dériveur Penn Yan de 12 pieds. Il ne pouvait pas régater sur ce bateau, car c'était l'unique voilier de ce genre à Newport Beach. Un ami de la famille lui suggéra de se procurer un Falcon, un dériveur monotype de 17 pieds, réputé à Newport Beach où la famille s'était installée en 1944, aux 15 ans de North. Il concourut sur ce bateau avec des résultats mitigés jusqu'au jour où son père, qui travaillait alors dans l'électronique, accepta un emploi à San Diego. La famille appréciait Newport Beach et était peu enthousiaste à l'idée de déménager. Pour amadouer son fils, alors adolescent, North père lui acheta un Star, une classe populaire à San Diego. Il prit place en tant qu'équipier et laissa son fils aux commandes du quillard de 23 pieds qui, depuis presque son apparition en 1911, attirait l'élite de ce sport. Dans ce contexte compétitif, ils allaient connaître des débuts peu prometteurs. North se souvenait : « Nous avons fini derniers tout l'été. Je pense que nous avons peut-être battu quelques bateaux en queue de flotte à la fin de cette première année. J'ai appris à mes dépens que le Star était trop exigeant pour mon niveau d'expérience, mais c'était très formateur. À l'époque, nous avions des voiles en coton, et il fallait un certain temps de rodage. Les voiles de notre bateau étaient usagées et mal conçues, alors j'ai cherché à comprendre comment les rendre plus rapides. »

North fréquenta ensuite l'université de San Diego State, puis le campus de Berkeley de l'Université de Californie. Il obtint un diplôme en génie civil avec option ingénierie des structures. En 1951, il trouva un emploi dans l'analyse des contraintes chez Ryan Aircraft. Deux ans plus tard, il était embauché en tant qu'ingénieur en chef dans le service de recherche et de développement de Narmco, une petite structure spécialisée dans la fabrication de pièces en fibre de verre pour l'industrie aéronautique. En réalité, l'intitulé de son poste était bien plus glorifiant que ne l'était sa tâche, comme le racontait North. Il conçut entre autres une section centrale pour un missile de l'Armée de l'air américaine.

Avec l'aide d'un ami, North mit au point une paire de skis innovants en métal. Le ski était une de ses passions, et encore plus après qu'il eut épousé sa femme, Kay, férue de ski. À l'époque, la société Head avait mis sur le marché des skis métalliques à usage récréatif, mais « ils avaient un problème avec les carres métalliques des skis qui avaient tendance à se détacher », se rappelait North. Sur les skis qu'il avait conçus, la carre faisait partie intégrante de la semelle qui était elle-même structurelle. Ils étaient davantage destinés aux compétiteurs qu'aux skieurs occasionnels. « Ils semblaient plutôt performants. J'étais décidé à les fabriquer, mais je n'arrivais pas à convaincre Narmco. Alors je leur ai proposé de le faire à mon compte. Seulement, en tant que salarié, je ne disposais pas du droit de

Lowell North et Peter Barrett, le bras droit de North, régatant à bord d'un Star (au premier plan) au cours des sélections olympiques de 1972. Alors que le duo a remporté la course finale dans 40 nœuds de vent, il finissait troisième au classement général. North, qui a fondé North Sails en 1957, a décroché quatre titres de champion du monde de Star et une médaille d'or olympique dans cette classe en 1968, ainsi qu'une médaille de bronze olympique dans la classe des Dragons en 1964. (Photo North Sails, LLC.)

propriété intellectuelle, et ils ne m'ont pas accordé de dérogation pour le faire même si le projet ne les intéressait pas. J'étais un peu contrarié quand pratiquement au même moment Kay m'annonçait qu'elle attendait notre premier enfant.» C'était l'occasion alors pour North de se lancer seul dans les affaires. «C'était maintenant ou jamais.» North quitta son emploi de fabricant de missiles et décida sur un coup de tête de devenir fabricant de voiles. Contrairement à Hood, dont les débuts étaient opportuns, North ne bénéficia d'aucune révolution industrielle dans le textile pour lancer sa carrière. Dès lors, son attention se porta sur le dessin des voiles, plus précisément sur la forme du profil aérodynamique, plutôt que sur les matériaux.

Il fit ses premières armes dans l'industrie en fabriquant une grand-voile de forme insolite pour son Star à bord duquel il participa aux championnats d'hiver de 1959 à Los Angeles. Cette grand-voile était munie d'un tuyau extensible de poste à souder au niveau du guindant et de la chute. L'idée était que ce matériau, ni plus ni moins un élastique, pourrait s'étirer pour donner plus de volume à la voile au portant. Les allures de largue et de vent arrière dominaient dans cette régate, et North remporta le championnat. Le jeune fabricant de voiles pensait qu'il s'agissait d'un design révolutionnaire, mais trente ans plus tard, son opinion évolua. «J'étais convaincu que c'était une idée brillante parce qu'elle venait de moi. C'était un concept différent, et les gens aiment acheter des choses différentes, mais, en vérité, c'était un gadget. Cette voile semblait rapide, car à cette époque les voiles n'étaient pas terribles. C'étaient les débuts du Dacron, et le tissu était tout simplement déplorable.»

Après cette victoire, les gens commencèrent à prêter attention au nouveau fabricant de voiles, Lowell North, mais cela n'était pas suffisant pour subvenir aux besoins de sa jeune

famille. Alors North monta une société de conseil en ingénierie, et sa femme continua à travailler pour un avocat. Il embaucha un fabricant de voiles expérimenté qui travaillait pendant la journée tandis que North consacrait quelques heures dès qu'il le pouvait dans la soirée à tenter de comprendre ce qui rendait une voile rapide et une autre lente. « En fait, j'avais appris à mes débuts à gagner des courses en Star en démontant une voile et en la modifiant jusqu'à ce qu'elle soit un peu plus rapide. C'était vraiment ainsi que l'on gagnait des courses. Les voiles étaient si mal conçues et mal fabriquées à cette époque que pratiquement n'importe quelle modification les améliorait. Je pensais vraiment savoir à quoi devait ressembler une voile rapide. J'avais quelques idées préconçues de forme rapide de voile, mais, en vérité, cette approche nuisait vraiment au progrès. Il m'a fallu environ cinq ans pour me rendre compte que je n'avais pas la moindre idée de ce à quoi devait ressembler une voile. Quand ça avait l'air pas mal, ça ne l'était pas, et quand ça avait l'air désastreux, ça allait vite. »

North prit une mesure radicale. Il ferma les yeux. Il se détourna de ce que les voileries avaient reproduit depuis des siècles, et des méthodes de Ted Hood, de loin le maître en la matière depuis 1952, pour dessiner des voiles en se basant sur ce qui semblait visuellement correct ou sur ce qui semblait être la forme aérodynamique parfaite. « Cette prise de conscience est née de certains tests de voile que nous avions faits », confia North. « Les formes que je pensais être plus rapides ne l'étaient pas. Me rendre compte que j'ignorais tout des profils de voiles a été d'une aide précieuse. Je voulais alors tester une grande diversité de formes dont certaines se sont révélées plus rapides. Cette objectivité nous a permis de faire de grands progrès en matière de profil de voile dans les années suivantes. »

Un autre événement convainquit North que la voile ne pouvait être intuitive. Grâce à une campagne pour un 12M, il obtint une subvention de recherche pour effectuer des tests en soufflerie à l'Institut de Technologie du Massachusetts. « L'un des résultats les plus intéressants fut d'inverser les profils de la grand-voile et de fixer la chute au mât. Nous avons observé que ce profil de grand-voile au creux reculé générait le maximum de force propulsive. Nous l'avons testé à l'échelle 1, et nous étions plutôt satisfaits des performances de cette voile. On avait plus de puissance : plus de portance et moins de traînée. Cela nous a conduits à plusieurs profils de voiles que nous n'aurions pas imaginés ou testés autrement. » Quand North décida de défier Hood directement, il observa longtemps et minutieusement ses tissus. Il en conclut que l'avantage de Hood, à savoir la méthode de tissage, pouvait être surmonté. Avec un peu d'acharnement, North pourrait apprendre à dupliquer le procédé. Néanmoins, il décida d'emprunter une autre voie que d'essayer de combler les cinq années de retard qu'il avait sur Hood. North considéra que là où il avait le plus à gagner, c'était dans la finition du tissu. Il se spécialisa dans les finitions pour minimiser l'allongement, ce qu'on appelait les finitions de résine. Ainsi, plutôt que de tisser le Dacron plus serré, comme le faisait Hood, North appliquait une enduction plastique à la fin du processus pour mieux contrôler l'allongement[6]. La méthode ressemblait à la recette secrète du bain de silicate inventée par Hood, mais dans ce cas précis, le plastique appliqué dans un bain aqueux devenait rigide en durcissant. Ce plastique, en général de la mélamine, comblait les interstices entre les fils et les filaments pour mieux résister à l'étirement. Et lorsque la voile était neuve, il semblait donner une forme tridimensionnelle plus rigide. Le contrôle de l'étirement par le tissage ou par la finition était une autre différence fondamentale entre Hood et North, et la plupart des autres voileries de cette époque. Même si le tissu de voile n'était pas son centre d'intérêt principal, North réalisa qu'il devait maîtriser les caractéristiques d'étirement du Dacron. Ce matériau de voile était certes moins élastique que le coton qu'il remplaçait, mais il s'allongeait malgré tout. De plus, pratiquement chaque rouleau de Dacron présentait des caractéristiques d'allongement différentes.

Dans une certaine mesure, l'allongement du tissu peut être corrigé en dessinant une voile plus plate. Une fois la voile « rompue », celle-ci prendra sa forme propre. Cependant,

6 C'est Howe & Bainbridge, mentionné ci-dessus (Bainbridge International), fournisseur de tissus réputé dans la région de Boston, qui effectua le travail pour North.

plutôt que d'estimer au mieux l'allongement d'un matériau, North avait besoin de le connaître précisément afin de compenser ses faiblesses. Une première étape consistait à concevoir un dispositif simple de test de résistance à l'allongement du tissu dans trois directions : biais (diagonale à 45 degrés), trame et chaîne. Le tissu à voile a une meilleure résistance aux charges dans la direction des fils, c'est-à-dire dans le sens de la chaîne et de la trame, mais résiste moins bien à l'allongement en dehors de la direction des fils ou en diagonale. En fait, les fils résistent aux charges qui les sollicitent dans leur axe tandis que les charges de biais sont uniquement supportées par l'entrecroisement des fils. Malgré un tissage serré, le mouvement sera toujours possible si on sollicite le biais, ce qui se traduit par un allongement.

Pourtant, l'allongement n'était pas la seule contrainte. North était également préoccupé par la longévité du tissu. Ainsi, durant les premiers jours de North Sails, il roulait pendant deux heures entre son loft d'origine situé à San Diego et un nouveau site basé à Seal Beach avec des bandes d'échantillons de tissu attachées à l'antenne radio de sa voiture. De retour, North testait l'allongement de ces bandes fatiguées et reportait les courbes sur le même graphique que les échantillons non sollicités provenant du même rouleau de tissu. La différence d'élongation indiquait l'éventuelle détérioration à prévoir sur une saison de navigation. Aussi empirique qu'il pût être, ce test de résistance au faseyement était pourtant devenu la norme dans l'industrie.

Dans un souci d'économie d'énergie et afin de réduire son temps de trajet, North développa une machine de test au faseyement du tissu qui faisait tourner les échantillons sur un appareil semblable à un moulin à vent[7]. Quelques années plus tard, North testait des voiles de Soling. Pour effectuer les essais en mer, il engagea Heiner Meldner. Ce professeur, originaire d'Allemagne et spécialisé dans la dynamique des fluides et la fusion par laser, enseignait à l'Université de Californie à San Diego. Bien que nouveau dans le monde de la voile, Meldner était un pilote de planeur chevronné et débordait d'un enthousiasme créatif. Au cours d'une même journée, il proposa de nombreuses idées à North sur la façon de rendre les bateaux plus rapides. North, un personnage qui était fait de la même étoffe que Meldner, se passionnait pour ce genre de discussions. À la fin de la journée, Meldner lui expliqua que les tests de voile pourraient être plus efficaces et rapides sur ordinateur. « Si c'est le cas, vous pourriez nous rendre riches », lui répondit North. Après un an d'absence, Meldner réapparut et annonça : « Eh bien, maintenant, je pense pouvoir tester des voiles analytiquement. Faisons un essai. » Le moment était opportun. En effet, lorsque Meldner lui suggéra l'idée, North venait de terminer dix jours de tests sur des voiles de 470 en vue des prochains Jeux olympiques. Cinq focs furent testés avec la même grand-voile, et après de longues heures passées sur l'eau, North se sentait assez confiant pour hiérarchiser leur vitesse. « Pour être honnête, confia North, je ne disposais auparavant d'aucun autre moyen pour déterminer laquelle de ces voiles était plus rapide, même en observant leur forme. C'était l'occasion de voir comment le programme informatique de Meldner analyserait les données. » « Très bien, essayez de classer la vitesse des focs dans le bon ordre », lui demanda-t-on après lui avoir spécifié les formes des voiles. « Étonnamment, il obtint exactement les mêmes résultats que nous. Je pensais qu'il était soit très intelligent, soit très chanceux. Pour le confirmer, nous lui avons fourni d'autres tests, et de nouveau ses résultats étaient corrects. » Durant les cinq années suivantes, Meldner effectua la quasi-totalité des tests sur ordinateur pour North, des voiles des Blue Jays à celles des 12M. Les tests informatiques de Meldner étaient validés en grandeur nature sur l'eau, et à l'occasion, il proposait des formes qui n'étaient pas réalisables, racontait North. « Mais nous avons fait plus de progrès en cinq ans de travail sur les profils de voile que jamais auparavant. »

---

7 L'industrie du textile disposait de machines pour tester les tissus, tels que le dispositif Scott, mais Lowell North n'avait pas les moyens de s'en procurer un. Il conçut alors un testeur plutôt rudimentaire, en utilisant un poids de 45 kg et une pince-étau. North affirmait qu'il était probablement le premier fabricant de voiles à utiliser un dispositif de test de tissus. « Je rendais Bainbridge fou en essayant de leur faire tester les tissus. »

Peu de temps après le début des travaux de Meldner, Lowell North entendit parler de Tom Schnackenberg, un Néo-Zélandais qui travaillait sur le site canadien de North. Avant de devenir fabricant de voiles, Schnackenberg était sur le point de finir sa thèse de doctorat en physique nucléaire à l'Université de la Colombie-Britannique. North rencontra Schnackenberg. « J'ai réalisé qu'il était au niveau de Heiner Meldner, peut-être meilleur même, parce qu'il avait une grande expérience pratique de la voile en plus de la théorie. » Il persuada Schnackenberg de venir à San Diego où celui-ci collabora avec Meldner. Pour son premier programme de dessin de voiles, Schnackenberg développa environ 200 ensembles de courbes, appelées « modèles de bande ». Ces différentes courbes, qui mesuraient entre 6 et 15 mètres, furent découpées dans du Mylar. Certaines étaient de simples arcs de différents rayons ; d'autres avaient une forme très droite à l'arrière et très incurvée sur le devant ; d'autres encore se situaient entre les deux. Puis il mit au point un programme informatique qui sélectionnait parmi ces 200 courbes celles qui devaient être utilisées pour façonner une pince particulière et comment cette dernière devait être utilisée. Le programme fonctionnait « admirablement bien », racontait North.

Schnackenberg poursuivit ce travail, et en dix ans environ, l'entreprise dessinait des voiles sur informatique, les testait en soufflerie virtuelle, effectuait une analyse structurelle numérique et les coupait avec un plotter X/Y commandé par ordinateur. On aurait tort de conclure que l'ordinateur avait permis à North de se lancer sur la voie d'un progrès sans faille. À certains moments, la compagnie semblait avancer d'un pas et reculer de trois. Cependant, North ne se laissa pas décourager. Il considérait les programmes CAO et CAM (conception et fabrication assistées par ordinateur) comme un investissement pour l'avenir. Être un disciple ne l'intéressait pas, et si suivre son propre chemin prenait plus de temps – si la route était parsemée d'embûches –, ainsi soit-il. Il s'était pleinement investi dans une synergie rendue possible par la conception numérique. Aujourd'hui, les bases de la conception par ordinateur fondées par Lowell North se sont développées en une suite sophistiquée de 15 modules de logiciels (North Design Suite) exclusifs à North (chapitre 6).

C'était une période prospère pour Lowell North et Ted Hood, mais la domination de Hood dans la Coupe de l'America, l'événement le plus médiatisé dans le monde de la voile, était une véritable épine dans le pied de North. La Coupe de l'America de 1974 se révéla être l'épreuve de force entre les philosophies de Hood Sailmakers et de North Sails. John Marshall de North, qui avait ouvert une voilerie à Stratford dans le Connecticut pour concurrencer Hood, naviguait à bord d'*Intrepid*, le double vainqueur de la Coupe. Et à la fin de l'été, Hood rejoignit *Courageous* en tant que skipper. Il n'avait aucune intention de participer à la Coupe de l'America cette année-là. Bob McCullough, à la tête du syndicat *Courageous*, lui demanda de barrer le nouveau bateau, mais Hood déclina l'offre, parce qu'il n'appréciait pas suffisamment ce bateau pour s'y consacrer une année entière. Il délégua la responsabilité des voiles à bord de *Courageous* à son habile lieutenant, Robbie Doyle (plus tard responsable de Doyle Sailmakers), et Hood chargea son One Tonner, *Robin*, sur un cargo pour l'Angleterre où il devait participer à une compétition. Le cargo tomba en panne et dut rentrer au port. Désœuvré durant l'été, Hood prit part à la régate du New York Yacht Club Cruise qui finissait à Newport. Ce même été, pendant la Coupe de l'America, *Intrepid* de sept ans d'âge, avec sa coque en bois, dominait les nouveaux 12M, *Courageous* et *Mariner*, première génération de cette classe construite en aluminium.

Lorsque Hood accosta à Newport en août 1974, il fut accueilli par McCullough qui le sollicita pour « prêter main forte » à l'équipage de *Courageous*. Hood accepta et prit place dans la cellule arrière aux côtés de Bob Bavier, éditeur de *Yachting Magazine* et skipper du bateau. Quand on demanda à Hood s'il avait perçu *Intrepid*, équipé de voiles North, comme une menace pour son empire commercial, Hood répondit : « Peut-être en partie, je ne me souviens pas d'avoir ressenti un sentiment fort à cet égard. La performance de nos voiles me motivait, mais pas autant que l'excitation de naviguer sur ce bateau. » *Courageous* avait fait ses premiers bords avec des voiles Hood comme pratiquement tous les yachts de la Coupe de l'America depuis 1962, mais *Intrepid*, avec les voiles North, et John Marshall de North Sails à bord, remporta les épreuves éliminatoires de juin et juillet.

La Coupe de l'America de 1974 fut une épreuve de force entre les approches divergentes de conception des voiles de Ted Hood et Lowell North respectivement à bord de *Courageous*, sous le vent, et d'*Intrepid*. On peut distinguer les panneaux de 45 cm des voiles Hood sur *Courageous*, moins larges que ceux des voiles North sur *Intrepid*. Les panneaux étroits étaient une signature Hood. (Photo Dan Nerney.)

En août, le syndicat *Courageous* était à la dérive. Ils achetèrent alors des voiles North qui semblaient leur réussir et que Hood réglait du mieux qu'il pouvait ; la victoire semblait plus importante à ses yeux que la finition en plastique sur les voiles ou le logo au point d'amure. Puis Bavier partit et laissa Hood endosser le rôle de skipper. Dennis Conner, qui avait navigué avec Ted Turner sur l'orgueilleux *Mariner*, rejoignit *Courageous* en tant que barreur de pré-départ. Le score était de 4 partout quand *Intrepid* affronta *Courageous* dans ce qui était évidemment l'ultime combat entre defenders. La dernière fois que la compétition avait été aussi serrée, c'était en 1958 quand *Vim*, avec Hood à son bord, avait bataillé contre *Columbia* jusqu'au bout. Ce jour de septembre 1974, un vent fort de 30 nœuds soufflait sur le plan d'eau – un terrain inconnu pour les 12M dans l'ère pré-Perth de la Coupe, mais le temps s'était écoulé. Un defender devait être nommé pour faire face aux Australiens de *Southern Cross*, le premier des défis dirigés par Alan Bond. L'été se résumait à cet événement d'une importance majeure. Mais, aussi palpitant que le résultat de cette régate pût être, ce qui fascinait tout autant les initiés de ce sport, c'était le dénouement de la bataille commerciale que se livraient Hood et North. La hiérarchie dans le monde de la voilerie pouvait fort bien basculer en ce jour venteux de septembre 1974. La ligne de départ franchie, Hood prit les commandes de *Courageous*, jusque-là aux mains de Conner qui avait mis à profit ses qualités de barreur de pré-départ. Puis, ne laissant aucun doute sur l'autorité à bord, Hood décida d'utiliser ses propres voiles, et non celles de North. D'autant plus qu'il s'agissait d'une grand-voile de petit temps fabriquée pour *Intrepid* sept ans plus tôt. Lorsque la voile de Hood, avec son fil brun distinctif et sa légère teinte jaunâtre, fut hissée dans 30 nœuds de vent, McCullough, un futur commodore du New York Yacht Club, saisit le micro de la radio du bateau suiveur. Cet homme, à la forte carrure et au pragmatisme exacerbé, ordonna à Hood de remettre les voiles de gros temps de North. Hood répondit tranquillement, comme à l'accoutumée, mais avec fermeté : « Tant que je serai skipper du bateau, c'est moi qui déciderai des voiles à utiliser. »

La riposte était audacieuse, et s'il avait eu tort, il aurait été incendié. Hood et *Courageous* battirent *Intrepid* ce jour-là. On demanda au taciturne Hood si c'était le meilleur jour de sa vie. « Probablement, répondit-il, mais pas de beaucoup. » Hood et Conner défendirent ensuite avec succès la Coupe de l'America sur le score de 4-0 face au challenger australien *Southern Cross*. Ils avaient utilisé pour la plupart des voiles Hood. Il aura fallu six ans à North pour obtenir une invitation digne de ce nom au gala de la Coupe de l'America, en 1980, quand Dennis Conner opta pour les grands-voiles et génois North ainsi que pour les spinnakers Sobstad sur *Freedom*.

Ted Hood savourant sa victoire dans la course Ocean Triangle du SORC en 1975 sur *Robin II*, un Two Tonner de sa conception. Un an avant, Hood défendait avec succès la Coupe de l'America à bord de *Courageous* et était sacré Marin de l'Année. (Photo Michael Levitt.)

L'intérêt de Hood pour la voilerie s'estompa au cours de la décennie suivante. Après un quart de siècle au sommet du sport et des affaires, alors que son empire nautique s'était développé bien au-delà de ses espérances, il considéra la voilerie comme une affaire de jeune homme. Son manque d'enthousiasme grandissant était peut-être précipité par une autre révolution dans les voiles : le Mylar. Lorsque ce film de polyester fut laminé (collé) au Dacron, il en résulta un matériau léger et à faible allongement. Ce n'était pas une coïncidence si North fut le premier marin et fabricant à utiliser avec succès un matériau laminé sur *Enterprise*, le bateau qu'il avait barré pour un temps dans les sélections de la Coupe de l'America de 1977.

Par ailleurs, Hood s'accommodait peu des ordinateurs qui commençaient à faire leur apparition dans la plupart des voileries. Un jour, il dépensa 100 000 dollars pour tenter d'informatiser son système de voilerie, mais il perdait patience quand la machine commettait des erreurs. « Je l'ai jetée par la porte », racontait-il. C'était certainement une réaction irréfléchie. Pourtant, Hood faisait face à un autre démon : son propre génie. Personne dans l'organisation – et on peut le dire, dans le monde – n'avait un œil aussi affûté que lui pour les voiles. Quelqu'un de plus communicatif ou plus à l'aise avec le langage informatique aurait plus facilement partagé sa vision avec ses collègues, mais avec la « base de données » dans la tête d'un seul homme, l'entreprise était vulnérable. Finalement, cette brèche profita à North Sails. Hood vendit ses intérêts à Marblehead pour s'installer à Rhode Island et se concentrer sur la conception de voiliers – une fascination de longue date –, sur la construction de bateaux, sur la gestion de son chantier, de son port de plaisance et de son complexe immobilier dans la baie de Narragansett. Il décéda le 28 juin 2013.

En ce début de XXIe siècle, l'ordinateur domine la conception et la fabrication dans la voilerie comme dans de nombreux secteurs high-tech. Dans la bataille qui opposait l'art à la science, c'est la science qui a triomphé. Les profils aérodynamiques sophistiqués d'aujourd'hui ont plus de points communs avec une aile d'avion de chasse conçue numériquement qu'avec une forme créée par un artiste, même par un Michel-Ange.

L'importance des techniques et des matériaux

Mahlon Dickerson, secrétaire d'État à la Marine américaine de 1834 à 1838, était préoccupé par l'approvisionnement en tissu à voiles pour ses navires de guerre. Jusque-là, la plupart des voiles utilisées aux États-Unis étaient faites à partir de lin importé d'Europe. En temps de guerre, la livraison aurait certainement été réduite. Une petite industrie locale de toile à voile s'était développée au cours des trente années précédentes, mais sa production était basée sur le coton plutôt que sur le lin. La fibre de coton, enveloppant les graines de cotonniers, était une matière nouvelle pour les tissus de voiles, et sa technologie n'avait pas encore fait ses preuves.

Le secrétaire Dickerson, qui avait servi sous les présidents américains Andrew Jackson et Martin van Buren, consulta les capitaines de ses navires de guerre à propos des voiles en coton. Certains suggéraient que cette matière était peu maniable et avait tendance à absorber l'eau. D'autres jugeaient le coton plus fragile que le lin quand d'autres encore, en revanche, le trouvaient moins élastique et plus stable dans le vent fort. Dès lors, adhérer à la nouvelle technologie ou se fier à l'ancienne s'avérait un choix difficile tant les paramètres étaient différents et les opinions contradictoires. Une erreur de jugement pouvait compromettre la souveraineté de la jeune nation et entraîner des pertes humaines considérables. Finalement, des années plus tard, la Marine opta pour les voiles en coton ; une décision qui relevait davantage des résultats d'une course de bateau que de considérations stratégiques.

En 1851, la goélette *America* prit part à une régate autour de l'île de Wight en Angleterre et s'imposa haut la main face à une flotte des meilleurs goélettes et cotres britanniques. Cette course, la Coupe des Cent Guinées, prit ensuite le nom de la Coupe de l'America en hommage à la goélette victorieuse. La Grande-Bretagne, qui se considérait alors comme maître de l'océan, fut ébranlée par la victoire de ce voilier venu du Nouveau Monde. Les spectateurs anglais voyaient là un changement inquiétant, certainement menaçant, dans l'ordre établi du monde. Toutefois, les observateurs les plus avertis dressaient un tableau moins alarmiste. Ils étaient impressionnés par la conception radicale d'*America*, notamment par la forme de ses voiles en coton américain plutôt qu'en lin. L'envoyé spécial du *London Times* commentait : « Les voiles en coton d'*America* étaient aussi plates que des feuilles de papier. Alors que les cotres déplaçaient beaucoup d'eau, leur proue constamment éclaboussée, et que les goélettes avaient de l'eau jusqu'au pied de mât, *America* était au sec. » Non seulement la goélette américaine ne prenait pas l'eau grâce à ses voiles plates en coton, mais elle naviguait aussi plus haut. À l'époque, les voiliers peinaient à naviguer au-dessus de 55 à 60 degrés du vent, alors que la rumeur racontait qu'*America* pouvait naviguer 6 degrés de plus au près. Cette capacité de remonter au vent

Peinture de James Bard représentant la goélette *America* en 1851, l'année où elle remporta la régate autour de l'île de Wight, nommée par la suite Coupe de l'America en son honneur.

En face, un membre de l'équipage d'*Alvimedica* reproduit le fameux « hang 10 » à la façon des surfeurs lors d'une course transatlantique entre Newport (États-Unis) et Southampton (Angleterre) avant le départ de la course Volvo Ocean Race 2014-2015. (Photo Amory Ross / Team Alvimedica.)

marqua durablement la communauté nautique si bien qu'au XIX^{e} siècle on considérait cette aptitude comme un avantage tactique en régate comme en temps de guerre.

Autre conséquence de cet événement, les voiles en lin sur les voiliers, navires de guerre et de commerce disparaissaient petit à petit au profit des voiles en coton. Ce n'était pas la première fois, et guère la dernière, que les matériaux changeaient ainsi le cours de l'histoire dans la voilerie. Cela dit, toutes les fibres appliquées dans ce secteur, au moment de l'impression de ce livre en 2016, ont été utilisées depuis vingt-cinq ans, et certaines d'entre elles depuis soixante-dix-huit ans. Par exemple, l'introduction du nylon, matériau utilisé dans les voiles de portant, remonte à 1938. Le Dacron, ou polyester, a été employé en voilerie pour la première fois vers 1950. L'aramide, commercialisé sous la marque Twaron, et d'autres matériaux comme le Technora et le Kevlar sont arrivés sur le marché vers 1971, tandis que le Spectra/Dyneema (noms commerciaux pour le sigle imprononçable UHMWPE) est apparu en 1980. Enfin, le Vectran existe depuis 1990, et le carbone a été testé une première fois avec succès dans l'industrie en 1992.

Matériaux

La majorité des tissus à voile modernes sont composés de fibres industrielles. La plupart de ces fibres sont bien connues des marins, néanmoins leurs propriétés ne sont pas toujours aussi bien comprises. Nous allons explorer les fibres et matériaux les plus répandus dans la voilerie : polyester, aramide, film Mylar, carbone, Spectra/Dyneema, Vectran, PEN, nylon et Cuben Fiber. Puis, nous analyserons leurs propriétés qui incluent le module (résistance à l'allongement), la ténacité (résistance à la traction) et la sensibilité aux rayons ultraviolets entre autres.

POLYESTER

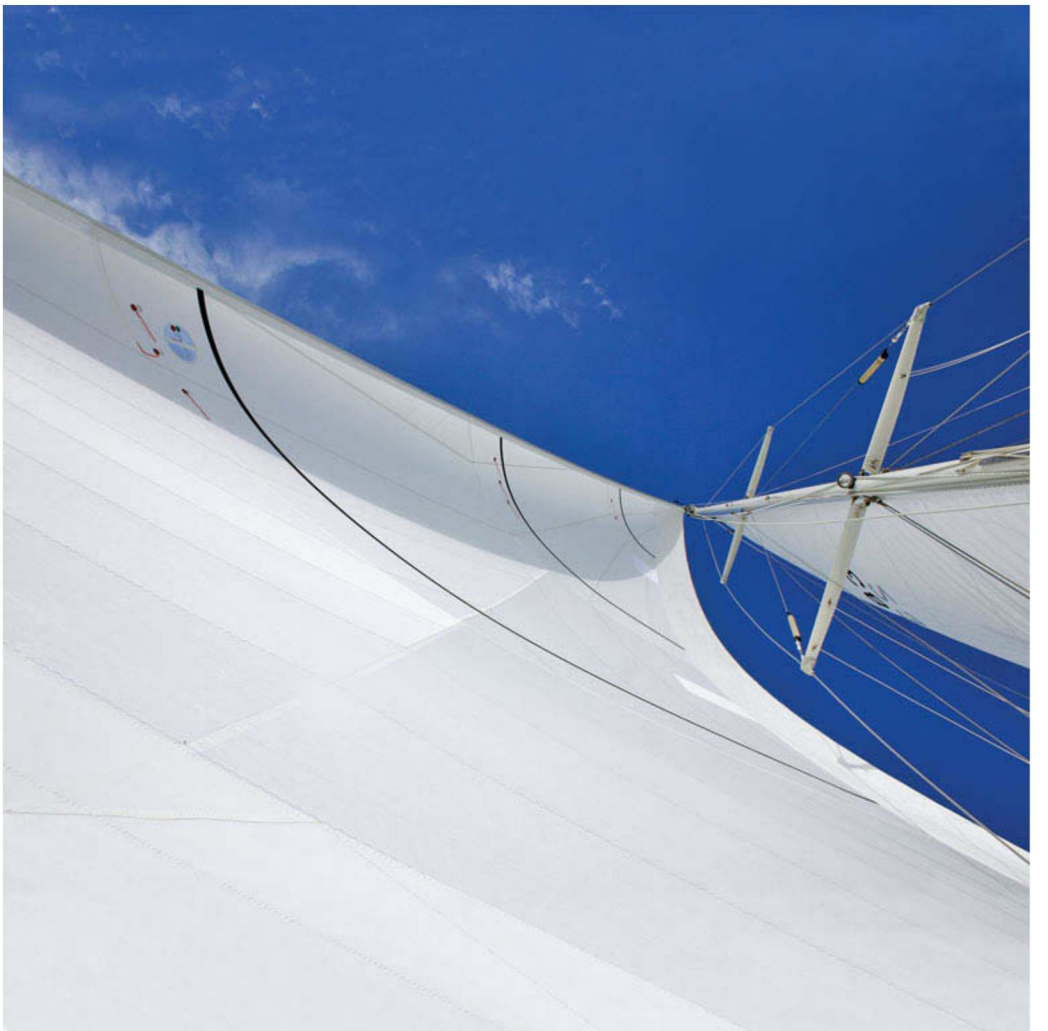
Le polyester est la fibre la plus courante aujourd'hui en voilerie. Elle est souvent appelée Dacron en référence au nom déposé par DuPont – même si ce dernier n'a plus produit de fil de qualité marine depuis de nombreuses années sous sa marque Dacron. À l'échelle internationale, l'offre de fibre de qualité supérieure pour les tissus à voile fluctue souvent selon l'intérêt porté à cette niche par les fournisseurs américains, européens et asiatiques, surtout japonais.

Le type de fil de polyester le mieux adapté aux tissus à voile a été commercialisé à différentes périodes sous des noms de marque tels que Térylène, Tétoron, Trévira, Diolen et d'autres encore. L'utilisation du polyester en voilerie est très courante en raison de sa bonne résistance, sa durabilité et son faible coût. Parce qu'il peut être chauffé et contracté au cours du tissage pour former un tissu serré et stable, le polyester reste un produit de choix pour les voiles de croisière et certaines voiles de course. Ce matériau se décline en plusieurs variétés. Par exemple, la fibre type 52 de DuPont était le fil standard présent dans les tissus de voile « Dacron » pendant de nombreuses années en raison de ses caractéristiques qui combinaient résistance, allongement relativement faible et thermo-contraction optimale.

C'est la thermofixation, traitement thermique, qui permet de resserrer le fil de trame lors du procédé de fabrication. À la sortie du métier à tisser, le tissu en polyester est d'un aspect doux et souple, difficilement reconnaissable en tant que tissu à voile. Dans cet état, on parle de « tissu écru » ou « tissu gris ». Un processus en plusieurs étapes appelé « finition » transformera ce tissu écru en tissu à voile polyester tel que nous le connaissons. Au cours de l'opération de décapage ou de nettoyage, le tissu est tout simplement trempé dans un bain d'eau chaude mélangée à un détergent. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, c'est l'étape où Ted Hood appliquait sa solution secrète, un composant comparable à du silicate blanc pour conférer à ses voiles en Dacron un aspect antidérapant. Le nettoyage élimine ensuite les résidus de collage et les graisses appliqués pendant le tissage pour empêcher les fils de se rompre. Le tissu est ensuite immergé dans un bain aqueux, à base de mélamine ou d'uréthane, qui sert à verrouiller la structure du tissu et à diminuer son allongement. La mélamine est une résine de plastique courante qu'on retrouve souvent

dans les habitations sous le nom de Formica. Appliquée aux tissus à voile, elle est appréciée pour sa robustesse et sa durabilité. Quant à l'uréthane, il est employé pour les voiles de croisière en polyester en raison de sa grande souplesse.

Qu'il soit enduit ou imprégné, le polyester est séché, puis thermofixé. Ensuite, il passe dans un four à des températures avoisinant les 200 degrés Celsius. Les fils de polyester se contractent à ces températures élevées et peuvent rétrécir de 20 à 25 pour cent. Cette opération rend le tissu déjà bien serré encore plus dense, diminuant ainsi l'allongement de biais ou en dehors de la direction du fil. Enfin, le procédé de calandrage consiste à passer le tissu entre deux rouleaux à très haute pression. Généralement, l'un des cylindres est un rouleau en acier chauffant, l'autre en fibre très dure. Ces rouleaux peuvent mesurer plusieurs décimètres de diamètre et sont pressés l'un contre l'autre à des forces supérieures à 50 tonnes. Le procédé de calandrage sert à presser le fil de chaîne et le fil de trame l'un dans l'autre, les obligeant à prendre l'empreinte l'un de l'autre et bloquer ainsi la géométrie du tissage.



Alden 44 équipé de voiles Radian North. Ces voiles de coupe radiale sont en polyester orienté chaîne. Elles peuvent être encore plus légères, et donc être utilisées sur de plus grandes unités. Comme ce type de tissu s'étire moins que le polyester ordinaire, elles contribuent à réduire la gîte du bateau et sont très résistantes. Elles sont aussi plus douces au toucher. (Photo North Sails Group, LLC.)

La popularité du polyester est principalement attribuée à ses qualités de résistance au pliage et aux UV ainsi qu'à son faible coût. À cela s'ajoutent d'autres propriétés tout aussi intéressantes : bonne durabilité, grande résistance à l'abrasion et faible taux d'absorption d'eau permettant à la fibre de sécher rapidement. En revanche, le polyester offre une moins bonne stabilité de forme que les matériaux high-tech décrits ci-dessous.

Les polyesters de qualité supérieure, comme le Radian de North – un tissu radial dont les fils de chaîne sont rectilignes et composés de fibres de haute ténacité –, ont un impact significatif sur le marché haut de gamme de la plaisance et des classes monotypes excluant les matériaux dits « exotiques » (carbone, Dyneema, aramide…).

Pour quelle raison les voiles de coupe radiale seraient-elles plus efficaces ? Simplement parce qu'on peut disposer les panneaux orientés chaîne plus près de l'axe des sollicitations. Cette disposition a pour conséquence un plus faible allongement du tissu orienté chaîne par rapport à une voile classique de coupe horizontale en Dacron. Ce type de voiles a rendu l'usage du Dacron possible sur des plus gros voiliers. Elles s'avèrent plus rapides sur des bateaux monotypes dont la jauge limite certaines options technologiques plus avancées et réduisent le moment de gîte sur les unités de croisière. Elles peuvent être plus douces au toucher et sont plus durables que les voiles ordinaires en polyester de coupe horizontale.

On a également recours au polyester pour les voiles de bon plein ou les voiles de portant par gros temps, conditions qui requièrent des tissus de haut module et de haute ténacité. Pour la plupart de ces voiles, l'excédent de poids est un compromis raisonnable.

Pour les voiles de près, le Dacron est utilisé en tant que matériau tissé. Tous les autres mentionnés dans ce chapitre sont des tissus laminés, c'est-à-dire composés de fibres, d'adhésifs, de films Mylar et parfois d'un scrim (tissé) de protection.

Enfin, d'un point de vue budgétaire, les variétés de polyesters fabriqués par les industriels du textile, y compris North, se situent entre le nylon et les matériaux dits « exotiques » que nous aborderons ci-dessous.

ARAMIDES

Parmi les tissus laminés les plus répandus, on trouve l'aramide dont l'appellation vient de la contraction des termes aromatique et polyamide. Cette fibre de haute performance est commercialisée sous diverses marques comme Twaron, Technora et Kevlar. Le Kevlar présente un ratio résistance/poids plus élevé que l'acier. Cela lui vaut entre autres d'être utilisé dans la fabrication de gilets pare-balles. Pour un allongement donné, les voiles en fibres d'aramide sont plus légères que les voiles laminées en Dacron et disposent d'une plage de vent plus étendue. Toutefois, leur coût est plus élevé et leur durabilité moindre. La fibre d'aramide, certes plus rigide, est sensible aux rayons UV et à l'usure due au pliage et au battement, par exemple en phase de lof dans les pré-départs. On trouve plusieurs catégories d'aramides selon leurs caractéristiques : différences d'allongement, de flexibilité, de poids et de coût. Les aramides de haut module (faible allongement) sont appropriés pour les voiles de course.

Le Technora est une variété d'aramide, semblable au Kevlar de module d'élasticité moyen en termes de composition chimique et de performance. Ce matériau possède une plus grande ténacité initiale, mais il se dégrade plus rapidement en raison de sa sensibilité aux UV, ce qui rend sa durabilité similaire dans la plupart des applications. Il est souvent revêtu d'un filtre anti-UV de couleur noire. Dans l'ensemble, cependant, il n'est pas plus plébiscité en course qu'en croisière.

De nos jours, la fibre d'aramide est principalement réservée aux voiles de compétition. Dans ce cas, les voileries utilisent des tissus laminés de type sandwich, procédé qui consiste à coller plusieurs couches sur le film de Mylar, souvent doublées avec un scrim (tissage très ouvert pour maintenir les fibres en place) afin de supporter les charges secondaires sur la voile en dehors de la direction du fil. On peut également ajouter une ou deux couches de taffetas pour protéger le Mylar de l'abrasion. L'aramide est également utilisé dans la fabrication des voiles 3DL, parfois 3Di, et « de type membranes ». Ces dernières, excepté le 3Di, sont composées d'une combinaison de fils, de Mylar et d'adhésifs (chapitre 5).

Les aramides ne rétrécissent pas à la chaleur et sont trop fragiles pour pouvoir endurer le procédé de fabrication agressif des voiles de polyester. Il est donc impossible de contrôler l'allongement de biais sans avoir recours au laminage de film (sauf pour le 3Di). Dans la majeure partie des cas, la fibre aramide est employée dans des matériaux laminés de la même manière que la fibre de polyester. Les scrims et les taffetas sont formés de fils d'aramide et laminés à un film sur une ou deux faces. L'aramide n'est généralement disposé que dans une direction dans un matériau laminé. Le maître-voilier agence ainsi les panneaux de voiles (laizes) en alignant les fibres d'aramide selon les charges principales.

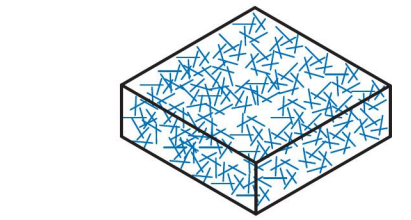
Dans la pratique, la plupart des aramides sont orientés chaîne. Ainsi, peu de coutures croisent les directions des charges. L'allongement de la fibre, plutôt que le glissement des coutures, constitue le paramètre de contrôle de la forme de la voile. À noter que les voiles 3DL et 3Di sont faites sans couture (chapitre 5). Ces voiles laminées peuvent être comparées au contreplaqué de qualité marine. Elles sont semblables aux matériaux composites dans la construction navale moderne – fibre, adhésif et noyau – mais sous une forme souple.

MYLAR

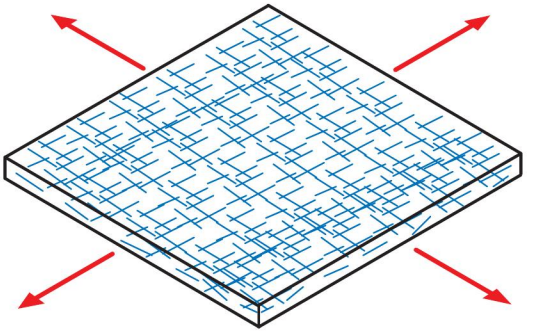
Dans le passé, les fabricants ont tenté de construire des voiles en Mylar pur, mais cette tentative s'est avérée infructueuse. Aujourd'hui, ce matériau est l'un des composants du procédé « sandwich » des voiles laminées. Il permet une bonne tenue du fil de couture, une

résistance à l'allongement dans le biais et une protection des fils principaux qui constituent le cœur de la structure. Il est intéressant de noter que la présence du Mylar dans les voiles 3DL de North est significative, de même que son absence dans le nouveau concept 3Di.

La première utilisation des voiles en Mylar remonte à 1964, pendant la Coupe de l'America. Les spinnakers des voiliers *Constellation* et *American Eagle* étaient en Mylar pur non laminé, mais ces voiles étaient peu efficaces car trop fragiles. Une deuxième tentative au cours des épreuves éliminatoires de la Coupe de 1977 s'est révélée plus convaincante. Les voiles d'avant d'*Enterprise*, le 12M barré principalement par Lowell North, propriétaire éponyme de North Sails, étaient en Mylar. Cette fois, une mince couche de ce matériau était ajoutée de chaque côté. Au cœur, se trouvait un tissu classique connu sous le nom de « polyester pour blouse d'infirmière ». Dans cette application pionnière, le film Mylar, également utilisé dans la Canada's Cup en 1978, était le matériau qui supportait les efforts, alors que le polyester tissé améliorait la résistance aux déchirures et à l'arrachement des coutures. Par la suite, le Kevlar tissé avec du Dacron reprenait les efforts principaux, et le Mylar supportait les charges secondaires en dehors de la direction du fil. Ce sont les célèbres voiles « sac à poubelle » que Lowell North utilisait, et dont la couleur verte rappelait celle des sacs de poubelle fabriqués également en Mylar. Mais le point faible de ces tissus laminés était le collage. À l'époque, les fabricants appliquaient des colles onéreuses avec parcimonie et non sans mal. Le taux d'échec des premières voiles laminées était préoccupant.



Après extrusion, les molécules de polyester prennent une orientation aléatoire.



L'étirement mécanique dans les deux directions produit un film plus mince où les molécules sont orientées bi-directionnellement et parallèles au sens de l'étirement.

Figure 2.1 Le film Mylar est obtenu par extrusion de résine de polyester.

Le film Mylar est obtenu par extrusion de résine de polyester. Au cours de ce processus, les longues molécules du polymère sont orientées de manière aléatoire dans le plan du film et perpendiculaires au plan. Ensuite, le matériau est mécaniquement étiré ou allongé dans le sens de la chaîne et de la trame. Ceci a pour effet d'allonger les molécules et de leur donner une orientation bidirectionnelle à partir d'une orientation aléatoire (fig. 2.1). Les molécules s'alignent principalement dans les deux plans dans lesquels elles ont été étirées. Dans ces deux directions, les molécules sont plus solidement liées entre elles et résistent mieux à l'allongement. En outre, un plus grand nombre de molécules dans le film sont aptes à résister à l'allongement. Le résultat est un film de polymère à faible allongement.

FIBRE DE CARBONE

Les tissus laminés en fibre de carbone ont été utilisés avec succès pour la première fois dans la Coupe de l'America de 1992 sur les voiles d'*Il Moro di Venezia*, fabriquées par North. Produit de référence encore aujourd'hui pour les compétitions de haut niveau, le carbone offre un rapport résistance à l'allongement/poids exceptionnel, mais il reste cher et offre une durabilité moindre par rapport à l'aramide. Il existe une large gamme de types de carbone, dont seulement un faible nombre tolère la flexion en utilisation normale de la voile.

Pour extraire la meilleure performance tout en ménageant la meilleure longévité possible, les techniques de lamination sont déterminantes, et la fibre de carbone a un prix. Cela dit, son utilisation au cours de ces dernières années sur les meilleurs voiliers s'est révélée très concluante. La fibre, très stable chimiquement, connaît une utilisation croissante, y compris dans le 3Di où les fibres de carbone sont étalées en filaments (chapitre 5). Ce matériau s'est montré tout aussi convaincant dans les arènes les plus exigeantes : la Coupe de l'America ou encore les Maxi 72.

Hyperion, ce voilier de 47 mètres, était le plus grand sloop au monde au moment de son lancement en 1998. Sa grand-voile, une North Marathon 3DL 680, est composée d'aramide et de fil de carbone structurel renforcé par deux couches de film de taffetas de chaque côté. (Photo North Sails Group, LLC.)

SPECTRA/DYNEEMA

Comparé aux aramides, le Spectra et son équivalent européen, le Dyneema, offrent une bonne solidité, ainsi qu'une excellente résistance à l'allongement et aux UV. Ils sont également moins sensibles à la flexion. Cependant, les voiles en Spectra/Dyneema restent sensibles au fluage (allongement permanent sous charge prolongée). Mais, pour les voiles de grandes unités de croisière performance, cette fibre a fait ses preuves depuis de nombreuses années maintenant. On recourt souvent maladroitement aux deux noms Spectra/Dyneema pour le même produit, car les voileries emploient ces deux fibres de manière quasiment interchangeable. Le Spectra/Dyneema est également utilisé aujourd'hui dans les voiles 3Di de North, combiné à la fibre de carbone ou aux aramides cités ci-dessus.

VECTRAN

Cette fibre est un polymère à cristaux liquides ou LCP (*Liquid Crystal Polymer* en anglais). Elle présente une résistance à l'allongement comparable aux aramides standards et une meilleure ténacité à l'état neuf. Le Vectran se distingue des aramides dans sa composition chimique et pour sa résistance à la flexion légèrement meilleure, à condition qu'il soit bien protégé des UV. La fibre reste tout de même plus sensible aux UV que les aramides et le Spectra/Dyneema. Pour cette raison, les voileries privilégient ce dernier pour les voiles de croisière de haute performance.

PENTEX

Le Pentex, ou PEN, est une fibre dont la résistance à l'allongement se situe entre le polyester et l'aramide. Elle est légèrement plus solide que le polyester, mais beaucoup moins que l'aramide. Cette combinaison et son coût proche de celui de l'aramide limitent ses applications. Dans les classes monotypes qui n'autorisent que les voiles en polyester, cette fibre a été considérée comme un polyester et peut être employée en tant que telle.

NYLON

Le nylon est utilisé pour la plupart des voiles de portant en raison de sa légèreté, de sa solidité et de son élasticité. Cette dernière lui permet d'absorber les chocs, d'être plus facile à contrôler et plus stable dans les vagues qu'un matériau en polyester. Disponible dans une variété de couleurs agréables, le nylon est aussi un des tissus les plus facile à teindre. Les autres options pour les voiles de portant, qu'elles soient asymétriques ou symétriques, en particulier aux allures les plus serrées, sont le polyester, le Cuben Fiber et le 3Di.

CUBEN FIBER

Les droits d'exploitation du Cuben Fiber dans le secteur de la voilerie sont désormais détenus par North Sails. Le Cuben Fiber est un matériau où la fibre fabriquée à l'origine comme un fil ou un « tow » (de nombreux petits filaments regroupés pour former un fil plus substantiel) est étalée en filaments adjacents formant une bandelette. Ces bandelettes sont généralement en Dyneema, mais peuvent être aussi en carbone ou aramide. Elles sont

Voiliers J 70 lors de la Key West Race Week en 2013. Les grands-voiles North sont en Radian ; les spinnakers asymétriques North en polyester tissé. (Photo Sharon groupe Verts / North Sails, LLC.)

orientées et disposées entre deux films particulièrement minces. Ces films peuvent être en polyester (Mylar), en Cubic Tech nommé « K », ou en films fluorurés appelés « FC ». Le matériau est produit en petites quantités en autoclave (long processus) pour assurer une lamination extrêmement consolidée et un matériau aussi léger que possible.

3DL/3DI

Outre leur utilisation principale dans les voiles de près, le 3DL et le 3Di trouvent aussi des applications pour les voiles asymétriques assez plates, aux allures débridées, sur les voiliers de course high-tech véloces. Les voiles 3DL et 3Di sont les matériaux les plus chers !

Les nouveautés

Comme indiqué précédemment, aucune nouvelle fibre n'a été adoptée en voilerie depuis plus de vingt ans. Le PBO est un matériau qui a fait quelques brèves apparitions et n'a pas survécu en raison de son extrême fragilité en flexion, causée principalement par sa sensibilité à la lumière sur toute la largeur du spectre. Cela dit, le PBO est toujours utilisé

avec succès dans les gréements courants et les câbles anti-torsion qui servent à rouler les voiles asymétriques.

En résumé, les voileries ciblent la meilleure combinaison de tous ces facteurs dans le choix d'une voile : le type de matériau (principalement la fibre, mais pas seulement), son application, sa conception et sa plage dans l'inventaire.

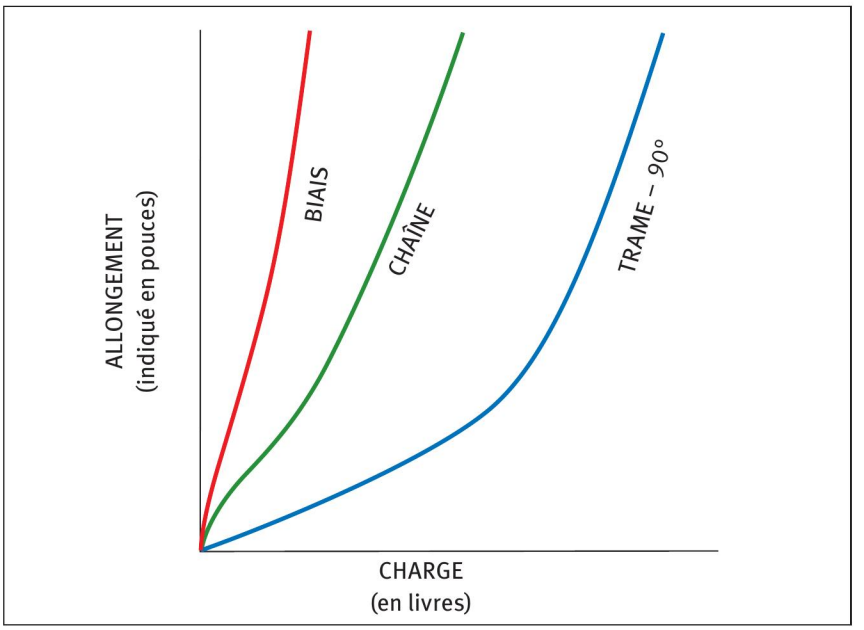


Figure 2.2 Comparaison d'allongement sous charge pour différentes directions de tissu. Il s'agit d'un tissu orienté trame utilisé dans la plupart des voiles crosscut.

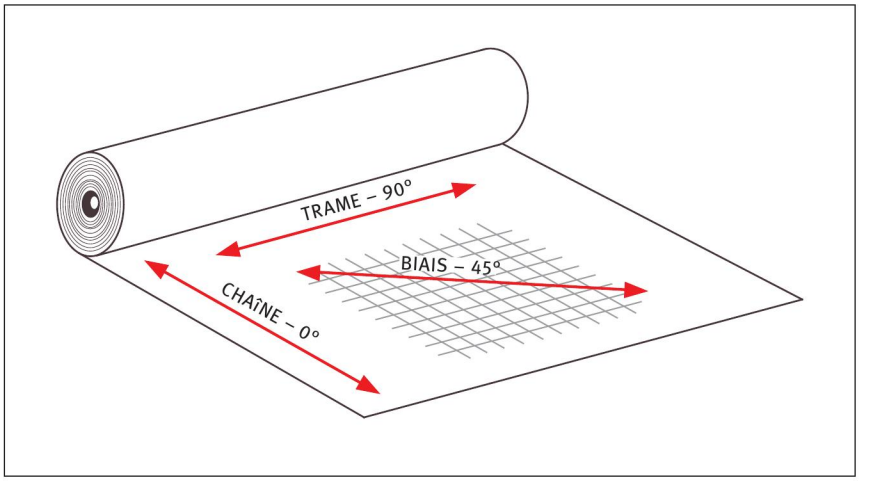


Figure 2.3 Directions du tissu.

Les matériaux et leurs propriétés

Après cet inventaire de la plupart des matériaux employés en voilerie aujourd'hui, nous allons maintenant étudier leurs propriétés. Celles-ci doivent être minutieusement prises en compte et contrôlées lors de la conception et de la fabrication des tissus et des voiles.

ALLONGEMENT ET MODULE

Le module indique la capacité d'une fibre à résister à l'allongement. L'allongement se mesure et se définit de multiples façons, ce qui rend sa compréhension complexe. La figure 2.2 est une représentation graphique typique de l'allongement en fonction de la charge sur le tissu. Il est important de noter que l'allongement peut varier selon la direction par rapport au tissu.

Les directions dans une toile tissée sont traditionnellement définies en utilisant des termes relatifs à l'industrie textile comme le montre la figure 2.3. La chaîne est la direction dans la longueur d'un rouleau de tissu ; les fils de chaîne issus de la bobine voyagent à travers le métier à tisser durant le processus de tissage. Le fil de trame, lui, est placé dans le sens de la largeur perpendiculairement au fil de chaîne. Quant au fil de biais, il forme la bissectrice de la chaîne et de la trame à 45 degrés. Comme le biais n'a pas de soutien direct des fils de chaîne et de trame, le tissu a tendance à s'étirer davantage dans cette direction pour une charge donnée.

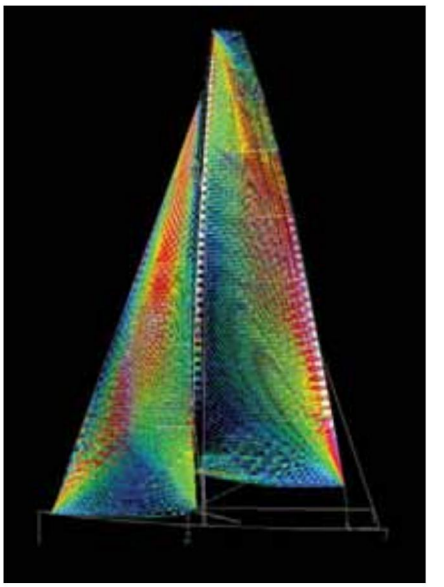
Dans le jargon de la voilerie, ces termes du textile *chaîne*, *trame* et *biais* sont remplacés par des valeurs angulaires modernes utilisées dans l'industrie de la fibre composite. Dans ce système, le zéro correspond à la chaîne, le 90 à la trame et le 45 au biais. De toute évidence, un maître-voilier doit avoir une connaissance précise des rapports entre la résistance à l'allongement selon la chaîne, la trame et le biais d'un matériau lors de la disposition et l'orientation d'un tissu de voile. Ces paramètres doivent compléter les connaissances du maître-voilier en termes de distribution de charges (où, combien et dans quelle direction les charges sollicitent-elles le matériau).

Pour compliquer la tâche, il faut savoir que les charges sont différentes sur les trois types de voiles (voiles d'avant, grands-voiles et voiles de portant) et que la distribution de pression change constamment selon le réglage des voiles et les variations du vent, sans oublier les changements dynamiques liés à l'état de la mer. Cette complexité a contribué à l'avènement des cartographies de contraintes dans le milieu de la voilerie.

Les mots d'ordre en voilerie moderne sont légèreté et faible élongation. Mais lequel de ces deux paramètres est prépondérant ? Au fil du temps, les matériaux ont bénéficié principalement de deux évolutions : leurs propriétés et leur mise en œuvre (par exemple l'orientation des fibres dans la voile). Les avancées ont permis d'influer sur l'un ou l'autre de ces deux facteurs : soit un poids réduit pour un module donné, soit un module accru pour un poids donné.

Cela nous amène à une autre variable : la longévité. Un gain de poids réduit habituellement la durée de vie d'une voile. Pour trouver le juste équilibre, il faut tenir compte du contexte d'utilisation d'une voile. Ainsi, pour un régatier pointu où quelques secondes par mille marins peuvent faire toute la différence, le poids prime la longévité tandis que le module demeure également un facteur déterminant. Pour un croiseur, c'est la longévité des voiles qui l'emporte sur le poids. Pour les bateaux de course comme pour les croiseurs, il faut savoir placer le curseur entre la haute performance d'un côté et la longévité de l'autre.

À cela s'ajoute une autre complication. La longévité comprend deux aspects distincts : la durée durant laquelle une voile maintient son intégrité – ce que recherchera un croiseur hauturier – ou la durée durant laquelle elle maintient ses performances – ce qui intéresse une équipe de la Coupe de l'America. Pour des raisons évidentes, les deux applications mèneront à des voiles radicalement différentes.



Ci-dessus, capture d'écran de Membrain, logiciel de North Design Suite. Le logiciel Membrain se base sur le modèle de plan de voilure du logiciel Desman qui modélise le gréement et les voiles en trois dimensions, et applique les champs de pression issus du programme Flow (CFD code à panneaux), déformant le gréement et les voiles comme une structure unifiée.

Trois des cinq métiers à tisser à lances de North construits par Dornier, sont désormais installés au Sri Lanka. Pour chaque métier à tisser, environ 1 800 fils de chaîne Spectra partent du cantre (rangement pour bobines) [à droite] jusqu'au métier à tisser, où ils sont tissés avec le fil en polyester de trame qui arrive sur le côté. Le temps d'installation est d'environ sept jours, ce qui permet au métier à tisser de fonctionner 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, et ce pendant environ 12 ou 13 semaines. Pour chaque mètre de fil de chaîne de Spectra, sur une largeur de 152 centimètres, près de 2,6 millions de croisements de fils doivent être parfaitement effectués. Si un croisement se dérègle, le métier à tisser s'arrête. (Photo North Sails Group, LLC.)

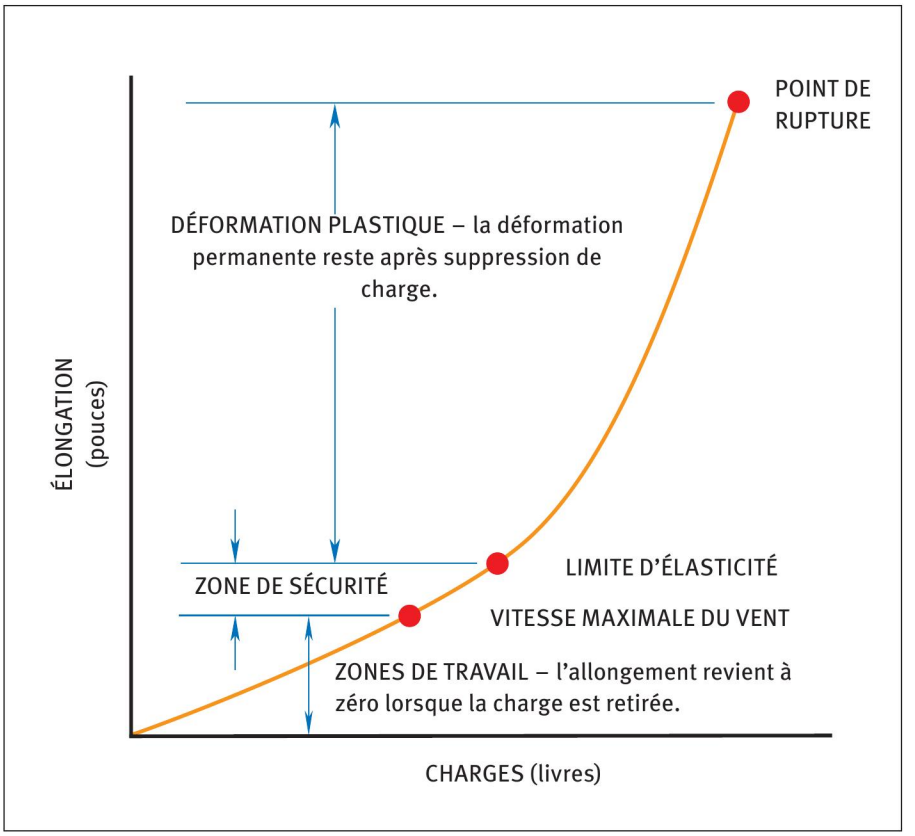


Figure 2.4 Tracé typique de résistance sous charge pour un matériau de voile.

Plus haut, nous avons indiqué que la résistance du nylon peut être attribuée à sa grande élasticité. Ce matériau absorbe bien les charges. À l'autre opposé du spectre, on trouve une aile de carbone rigide. Ce matériau est extrêmement raide et fragile (on peut faire l'analogie entre un élastique et un brin de spaghetti sec). Une voile souple en 3Di est ce qui se rapproche le plus de l'aile en carbone rigide. Le 3Di est doté du rapport raideur/poids le plus élevé de tous. On pourrait en conclure qu'il est le matériau le plus fragile dans l'arsenal des tissus de voile même si de nombreux efforts sont investis pour éviter la rupture. Ironie du sort, lorsqu'on s'intéresse à l'autre mesure de la longévité, le 3Di est le matériau le plus durable parmi toutes les voiles non rigides.

RÉSISTANCE ET TÉNACITÉ

Pour les voiles de portant ou les spinnakers, qu'ils soient asymétriques ou symétriques, la résistance est plus importante. Cela concerne principalement le nylon sous ses diverses déclinaisons : les spinnakers en nylon avec un revêtement qui stabilise le tissu léger et qui réduit efficacement la porosité à zéro ; les voiles en nylon sans revêtement, mais avec des fils de denier plus élevé, c'est-à-dire des fils avec une masse par unité de longueur accrue.

Comme nous le savons, les spinnakers se déventent de temps à autre, puis se gonflent brusquement. Pour cette raison, l'élasticité est désirable et nécessaire ; il faut faire l'analogie avec des amarres en nylon à trois brins et des lignes de mouillage en nylon. De toute façon, mieux vaut une voile élastique de portant qu'aucune voile !

La ténacité d'un tissu, comme l'allongement, est une propriété complexe. Elle dépend principalement de la rigidité du matériau. Un Dacron enduit d'un revêtement épais, par exemple, se brisera plus facilement qu'un Dacron de poids similaire légèrement enduit. On distingue deux types de résistance importantes. L'une d'elles est la résistance à la rupture, et elle est primordiale pour les voiles de portant. Il est difficile, en effet, de gagner une course si le spinnaker symétrique ou asymétrique se déchire en plusieurs morceaux !

La deuxième résistance est la limite élastique (ou module de Young). Il s'agit du seuil entre l'allongement qui se résorbe complètement d'une part, et la déformation permanente (élastique) de l'autre. Grâce à l'expérience acquise sur les machines à tester le tissu, les voileries ont réalisé qu'il existe une charge au-dessus de laquelle le matériau ne reprendra plus sa longueur initiale après suppression de la charge. Cette valeur de charge est importante, car elle détermine la capacité de charge maximale du tissu. En combinant cette valeur de limite élastique avec la valeur de charge prévue sur la voile (fig. 2.4), le maître-voilier détermine la vitesse de vent qu'une voile pourra tolérer.

Comme mentionné plus haut, les tissus pour spinnakers ne se limitent pas seulement au nylon. Les spinnakers asymétriques pour les allures débridées se rapprochent des voiles d'avant de près dans le petit air, en particulier sur les grands bateaux, relativement légers et plus raides à la toile. Il existe, par exemple, des spis en polyester. On a alors recours à des fils à forte ténacité. Néanmoins, en raison de la proximité entre la limite élastique et la résistance à la rupture pour ces voiles, il est préférable que ces voiles soient manœuvrées par des équipes professionnelles qui n'hésitent pas à changer de voile dès que les conditions de navigation l'imposent. Nous étudierons ce sujet au chapitre 9.

ALLONGEMENT GÉOMÉTRIQUE : EMBUVAGE ET FLUAGE

L'allongement géométrique ne se produit pas dans les fibres individuelles, mais dans les panneaux de tissus. L'une des causes les plus importantes de l'allongement géométrique provient de l'embuvage. Au cours des constructions traditionnelles de tissage, le fil de trame et le fil de chaîne se croisent en une trajectoire ondulée (fig. 2.5). L'embuvage est un mal nécessaire affectant les voiles tissées, mais il peut être maîtrisé. Par exemple, les fabricants peuvent cantonner l'embuvage dans une direction de tissage donnée selon la chaîne ou la trame, laissant une des directions quasiment dénuées d'embuvage. La figure 2.6 en explique le fonctionnement.

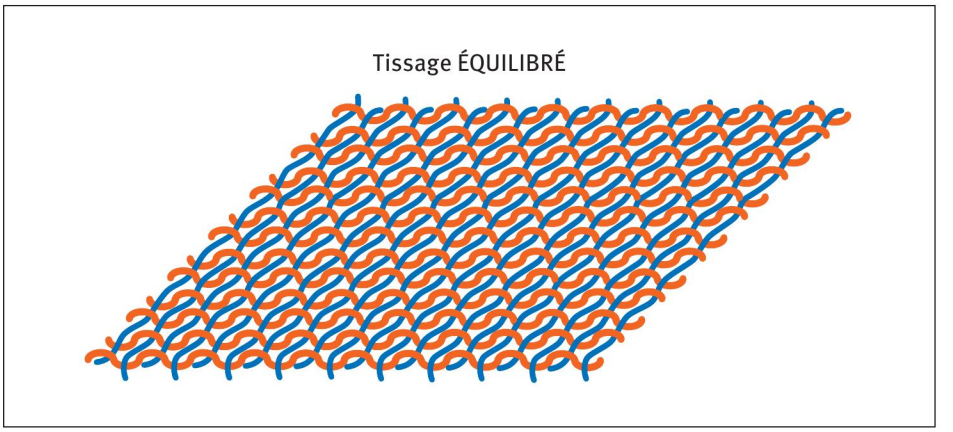


Figure 2.5 Dans ce tissage à armure équilibrée, les deux directions ont le même embuvage.

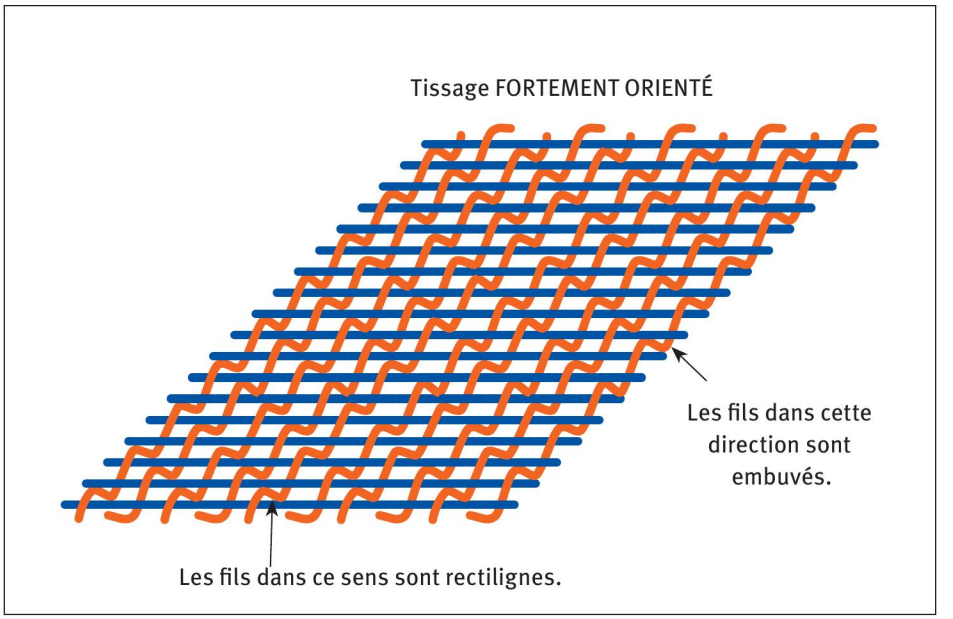


Figure 2.6 Dans ce tissage à armure toile hautement orienté, l'embuvage est limité à une seule direction.

C'est pourquoi certaines voiles triangulaires tissées comportent des panneaux horizontaux (tissu orienté trame) ; certaines sont composées de panneaux verticaux ou radiaux (orientés chaîne) ; et certaines sont équilibrées avec un embuvage égal dans les deux directions. Les matériaux tissés s'allongeront dès la charge appliquée. Cette tendance est inhérente au processus de tissage. L'embuvage est donc résorbé sous charge initiale. Cela se traduit par un allongement initial et permanent. L'allongement est donc différent du fluage. Il se produit, mais il disparaît après retrait de la charge, sauf si le seuil élastique est atteint (voir ci-dessus). On parle d'allongement élastique. En revanche, certains matériaux ou tissages au fil du temps ne retrouveront jamais leurs dimensions originales. Le fluage et l'élongation plastique sont les termes qui décrivent l'allongement non résorbable. L'un des objectifs en voilerie moderne est d'aligner les fils au module le plus élevé selon la direction des charges variables dans une voile. Par conséquent, les tissus orientés trame sont associés aux voiles à panneaux horizontaux, tandis que les tissus orientés chaîne sont associés aux voiles radiales.

La prédominance des voiles à coupe horizontale dans l'industrie – encore aujourd'hui – doit sa longévité à deux faits : les voiles à panneaux horizontaux nécessitent beaucoup moins de main-d'œuvre pour les assembler, et, à poids égal, le Dacron est moins cher au mètre carré que les laminés. Pour beaucoup, le Dacron est approprié, ou suffisant ; certains ne jurent que par lui. Les tissus en polyester sont généralement tissés avec des fils de trame droits et des fils de chaîne embuvés. Cependant, les tissus orientés trame ne sont pas appropriés aux voiles radiales où la longueur des panneaux dépasse la largeur des rouleaux de tissus disponibles dans le commerce.

Jusqu'à tout récemment, la solution pour la fabrication des voiles radiales était de laminer le tissu orienté trame au film de Mylar ; ce qui améliore la résistance dans le sens de la chaîne. Les finisseurs de tissus, ou « convertisseurs de toile à voile » comme on les appelle parfois, sont en bute aux limites des métiers à tisser en ce qui concerne les fils polyester en usage dans la voilerie. À cet égard, le tissage de tissu en polyester de haute

Au premier plan, *Decision*, voilier HPR (jauge High Performance Rule) doté de voiles 3Di. Au second plan, *Magnitude 400* et *Blade* lors de la 39e édition des régates internationales de Rolex en 2012. La voile 3Di est composée de bandes de filaments fabriqués soit en carbone/Dyneema, soit en aramide/Dyneema. (Photo Ingrid Abery/STYC.)

densité avec des fils de chaîne droits et très tendus s'est avéré un véritable défi. Il existe déjà une gamme de tissus polyesters orientés chaîne sur le marché, mais ils ont un tissage peu serré qui compromet les performances des fils de chaîne et de trame.

North Cloth a récemment combiné des matériaux uniques, en particulier des fils à haute ténacité, pour créer son tissu breveté Radian. Il s'agit du premier tissu à voile en polyester orienté chaîne dans l'industrie, conçu spécifiquement pour la construction radiale à panneaux. L'intérêt évident de ce matériau est son faible rapport allongement/poids que l'on peut désormais appliquer à une toute nouvelle gamme de voiles de croiseurs et de monotypes.

ALLONGEMENT DE BIAIS

Un autre type d'allongement géométrique est l'allongement de biais. Dans les tissus tissés, il s'agit simplement de la déformation des interstices de l'armure (l'intersection de la chaîne et de la trame) depuis des angles de 90 degrés en parallélogrammes. L'allongement de biais peut toutefois être maîtrisé. L'un des principaux avantages des matériaux laminés et des matériaux composites est la réduction de l'allongement de biais.

Une voile à panneau en aramide, de poids équivalent à une voile 3DL ou 3Di, est réalisable, mais non sans compromettre la performance dans la plage d'utilisation. Les voiles à panneaux tout aussi légères qu'une voile 3Di ou même plus légères, et de même taille, se déforment sensiblement plus rapidement. Si une voile à panneaux et une voile 3Di ont une résistance à l'allongement similaire, la voile 3Di sera 15 à 20 pour cent plus légère. Si une voile à panneaux et une voile 3Di ont des poids similaires, la voile 3Di aura une résistance à l'allongement nettement supérieure et une plage d'utilisation bien plus grande.

Jusqu'aux années soixante, les méthodes d'essai standard pour déterminer le degré d'allongement était de toucher simplement le tissu pour sentir la matière, en accordant une attention particulière à sa souplesse. Un tissu souple était synonyme de tissu élastique, et un tissu raide signifiait un faible allongement. Cette méthode s'avérait acceptable pour une petite gamme de matériaux. Par exemple, les résultats étaient généralement corrects lorsqu'on comparait un certain nombre de productions d'un même type de tissage. Cependant, le toucher n'est pas une science précise. Il ne permet pas de comparaison numérique pour l'enregistrement de données et ne permet pas non plus à deux fabricants de voiles au sein de la même voilerie de comparer leurs résultats. Des méthodes plus sophistiquées s'avéraient nécessaires.

Comme mentionné dans le chapitre 1, Lowell North était le premier fabricant de voiles à tester les tissus de voiles, à l'aide d'un dispositif de fabrication artisanale. Une fois que l'allongement a été reconnu comme paramètre essentiel pour les matériaux, les finisseurs de tissus et les voileries ont commencé à déterminer l'allongement sur des testeurs industriels standard comme la méthode de Scott. Une bande de tissu était montée sur le dispositif, et les observateurs mesuraient l'allongement par rapport à la

charge appliquée. Pour obtenir des résultats assez précis, la norme était d'utiliser des échantillons de 5 centimètres de large sertis entre les mâchoires de l'appareil espacées de 40 centimètres. Ces tests réalisés dans les trois directions principales : trame (0 degrés), chaîne (90 degrés), et biais (45 degrés), décrivent les performances intrinsèques du tissu. Des machines de mesure d'allongement plus modernes comme les testeurs Instron et United Calibration SSTM-2000 ont été développées depuis la méthode Scott. Ces nouveaux testeurs fonctionnent généralement de la même façon, mais ils fournissent des résultats plus précis.

POIDS DU TISSU

Si le poids n'était pas important, on pourrait tout simplement construire un tissu de voile à très haut module et de très faible allongement. Mais le poids importe. L'une des raisons est la manipulation des voiles. Il est plus facile de régler, ranger et déplacer une voile légère qu'une voile lourde. Une autre raison importante est d'alléger le poids dans les hauts. Car ce gain de poids abaisse le centre de gravité du bateau, diminuant ainsi le moment de gîte et le tangage.

Ce paramètre est tout aussi primordial pour un bateau de plaisance que pour un voilier de course pour des questions de sécurité, vitesse, confort et réduction de poids dans les hauts. Les effets préjudiciables du poids en altitude sont illustrés graphiquement quand un homme de forte ossature grimpe au sommet du mât d'un petit bateau. Voilà pourquoi l'entreprise North Technology Group prône la haute technologie de mâts et gréements en carbone fabriqués par sa division Southern Spars, et considère l'ensemble voiles et gréement comme le « moteur au-dessus du pont ».

SOUPLESSE

La flexibilité du tissu est déterminée par une combinaison de facteurs incluant l'allongement des fibres utilisées, l'épaisseur et le poids du matériau. Cette propriété s'applique différemment pour les voiles de course et celles de croisière. Pour les voiles de course, la flexibilité est souvent sacrifiée au profit d'un faible allongement, alors que pour les voiles de croisière, on privilégie la facilité de manœuvre au détriment de la résistance à l'allongement. Toutefois, grâce aux systèmes d'enrouleurs des voiles d'avant et de manœuvre simplifiée des grands-voiles, le marin de croisière d'aujourd'hui n'a plus autant à se soucier de ces paramètres.

RÉSISTANCE AUX DÉCHIRURES

La résistance à la déchirure est capitale pour sauver une voile d'une fin prématurée, ou au moins de la déformation, en proie aux manipulations, au contact des barres de flèche et des filières. Ce facteur constitue parfois une limite de poids minimale pour les matériaux tissés légers tels que les spinnakers en nylon et en polyester.

La résistance à la déchirure est aussi quelque peu affectée par les finitions de résine. Plus la résine ou la finition fige les fils et les filaments dans le tissu, plus le tissu se fragilise. Les fils de ces tissus fortement bloqués ont tendance à casser un à la fois, ce qui accroît d'autant plus la sensibilité à la déchirure. D'autre part, quand un tissu n'a que peu ou pas de résine, les filaments et les fibres sont libres de se déplacer ; ceux-ci ont tendance à se mouvoir et à se regrouper au pourtour d'une déchirure, évitant au tissu de se déchirer davantage.

La résistance à la déchirure est souvent étroitement associée à la solidité des coutures dans une voile à pinces. En effet, de nombreux facteurs, y compris la taille des fils, leur position et le degré de finition, contribuent à améliorer la résistance à la déchirure ainsi que la solidité des coutures.

Dans la pratique, les voiles tissées en Dacron sont les plus résistantes à la déchirure. Les voiles en polyester laminées font également preuve d'une bonne résistance à la déchirure, toutefois limitée jusqu'à un certain degré par l'exposition aux rayons ultraviolets du soleil.

Team *SCA* en 2014 lors de la Sevenstar autour des îles Britanniques (Sevenstar Round Britain and Ireland Race). (Photo Corinna Halloran / Volvo Ocean Race.)

Elles restent cependant les moins sensibles aux rayons ultraviolets, un facteur important pour la navigation dans les basses latitudes. Les voiles en aramide laminées résistent le moins bien à la déchirure, en particulier une fois que les fils ont été dégradés sous l'effet du soleil, des mauvaises manipulations et du faseyement.

POROSITÉ

La porosité se réfère à l'air qui passe à travers le matériau. Il est rare que cette propriété affecte le choix du tissu à voiles. Les processus de tissage serré, d'imprégnation de résine et de lamination utilisés pour contrôler la solidité et l'allongement résultent en une porosité quasiment nulle à l'exception du nylon très léger. Cette porosité zéro empêche l'air de traverser le tissu, un peu comme si l'on soufflait sur un écran.

Les spinnakers en nylon, pesant moins d'une once par yard (unité de voilerie), sont si légers et fins qu'il est difficile d'obtenir la porosité zéro. Comme nous l'avons décrit plus haut, certains tissus de spinnaker utilisent un revêtement de résine pour atteindre cet objectif. Mais pour la plupart des matériaux, une porosité zéro constitue une limite inférieure dans l'élaboration du nombre de fils minimal.

ABSORPTION D'EAU

L'absorption d'eau est un problème pour certains tissus à voiles, en particulier pour le nylon qui voit sa solidité diminuer d'environ 15 pour cent quand il est humide. Il s'allonge également trois fois plus et s'affaisse davantage dans le temps léger. Ceci explique pourquoi un spinnaker humide est plus susceptible de se déchirer alors qu'il retrouve toutes ses propriétés une fois sec.

Pour diminuer l'absorption d'eau, il est possible d'appliquer sur le tissu des résines et des matériaux de remplissage pour combler les vides entre les filaments et les fibres. Le plus souvent, il s'agit de petites quantités de pellicules hydrophobes, c'est-à-dire des revêtements déperlants, similaires aux produits de la marque Scotchgard. De manière générale, assurez-vous de bien sécher vos spinnakers en nylon en fin de journée. Mieux encore, évitez à tout prix de mouiller vos voiles de portant pendant les régates.

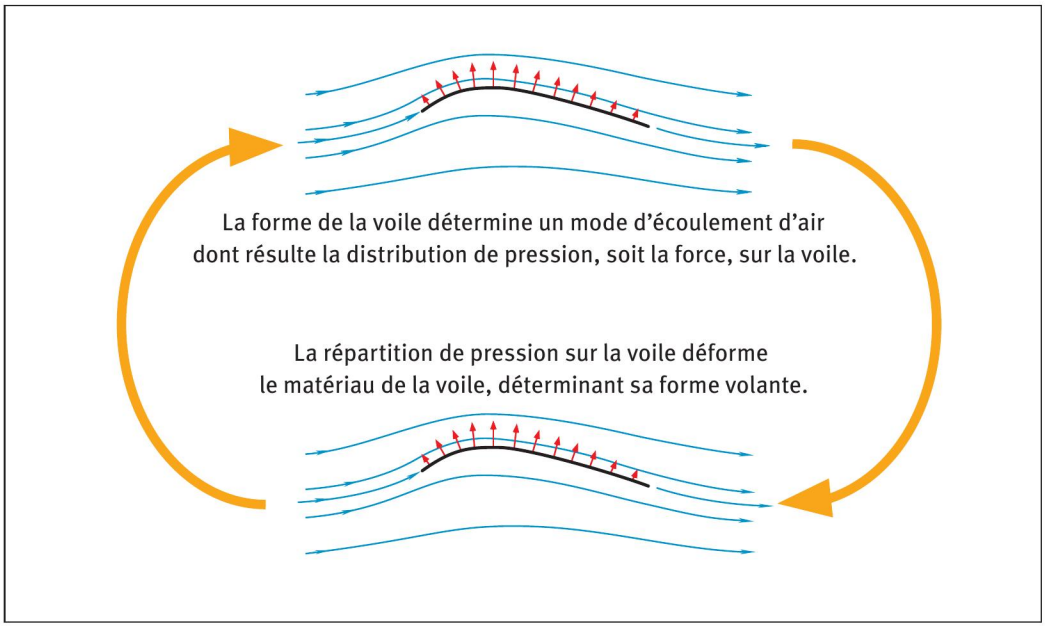


Figure 2.7 Relation entre la forme de la voile et la distribution de pression.

STABILITÉ AUX ULTRAVIOLETS

Les rayons ultraviolets du soleil peuvent briser les chaînes moléculaires et affaiblir les matériaux du tissu. Néanmoins, la stabilité aux UV des voiles est plus importante dans certains contextes que dans d'autres. Les voiles de loisirs utilisées à des latitudes plus élevées sont exposées à la lumière du soleil par intermittence et pour des périodes de temps relativement courtes par rapport aux autres produits textiles tels que les auvents et tentes.

Aussi, le Dacron, la fibre la plus couramment employée dans les voiles tissées, a une propriété d'autoprotection. Le soleil dégrade effectivement la surface du polyester, mais la pellicule affaiblie forme une peau qui protège les couches intérieures de la fibre. En revanche, les voiles de croisière utilisées à des latitudes plus basses sont susceptibles de subir d'importantes dégradations provoquées par les rayons ultraviolets du soleil. Des techniques de revêtement très efficaces ont été développées à cette fin comme couvrir la chute et la bordure des voiles sur enrouleurs d'une toile enduite spéciale. Cette toile protège alors le reste de la voile quand elle est enroulée.

Les tissus acryliques ayant une bonne stabilité aux UV sont souvent utilisés pour des produits tels que les tauds de grand-voile, et l'arrière et la bordure des voiles d'avant sur enrouleur. De nos jours, on a autant recours aux peintures spéciales anti-UV qu'aux tissus anti-UV. Quoi qu'il en soit et peu importe où vous naviguez, il est important de couvrir les voiles entre chaque utilisation.

Pour protéger un foc de croisière contre les effets délétères du soleil, des panneaux spéciaux, souvent faits de tissus acryliques, sont généralement ajoutés le long de la chute. Des peintures spéciales anti-UV peuvent être également utilisées. *Nepenthe*, un J40, est équipé de voiles en Norlam XG. (Photo Onne van der Wal / North Sails Group, LLC, 2013.)

MOISISSURE

La moisissure n'affectera pas un tissu de voile moderne sur le long terme. Cela dit, si elle n'est pas traitée, elle proliférera. C'est un petit champignon qui se nourrit d'organismes microscopiques dans l'air et se développe dans des conditions humides, davantage en eau douce qu'en eau salée. Il reste inévitable. La moisissure peut également apparaître sur des lignes d'amarrage, housses de voile, coussins et autres matériaux. La meilleure façon de l'empêcher de se former est de stocker vos voiles dans un environnement propre et sec. Et si cela n'est pas toujours facile, mieux vaut donc entretenir vos voiles en les nettoyant régulièrement et en les séchant avant de les ranger. Vous éviterez ainsi toute épidémie de moisissure[1].

1 En cas de moisissure sur vos voiles, le meilleur traitement contre sa prolifération et les taches occasionnées est de nettoyer les voiles avec une solution d'eau de Javel domestique diluée. La plupart des voileries offrent des services de nettoyage professionnel pour les grandes voiles, mais les petites voiles peuvent être nettoyées efficacement à la maison. Si vous le faites vous-même, voici quelques points importants à retenir. Ne jamais mélanger le chlore ou des nettoyants à base de chlore avec de l'ammoniac, cela peut créer des gaz phosgènes. Ne pas nettoyer le Kevlar ou les voiles en nylon avec du chlore car vous endommagerez le tissu irrémédiablement. Les voiles peuvent être traitées après un nettoyage en profondeur pour empêcher le retour de la moisissure, mais cette protection sera temporaire. La meilleure prévention reste l'inspection et le nettoyage réguliers de vos voiles.

Rituel de fin de journée

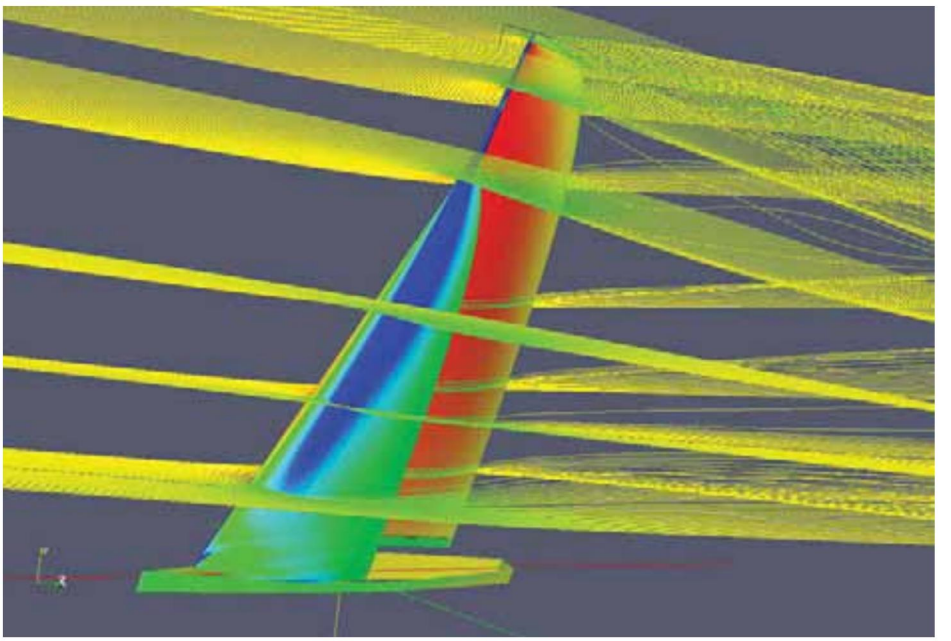
Les dessinateurs font face à un problème intéressant. La force et la direction du vent varient constamment, ce qui provoque des charges différentes sur les voiles. Ces mêmes charges affectent la forme des voiles en allongeant le tissu. De plus, la distribution de pression est affectée par les formes de la voile. C'est un processus itératif (fig. 2.7). Sans oublier les mouvements du bateau en mer, la flexion du mât et de la coque, et d'autres forces qui influent sur la forme des voiles. On comprend alors aisément que les propriétés du tissu – sa géométrie, sa résistance à l'étirement, sa solidité, sa flexibilité, la colle utilisée et son poids – jouent un rôle important dans la forme des voiles. Pourtant, à la fin de la journée, ces mêmes voiles doivent être repliées ou enroulées. La solution est évidente, mais pas forcément envisageable : une aile rigide comme celle que l'on trouve sur les catamarans Class C depuis 1971 ou sur les multicoques des récentes éditions de la Coupe de l'America. Par exemple, en 1988, au cours de la 27e Coupe de l'America, Dennis Conner devait, chaque soir, coucher son catamaran sur son flanc et faire surveiller l'aile rigide toute la nuit ou même la retirer entièrement. En 2013, les équipes de la 34e Coupe de l'America à San Francisco se sont également pliées à ce rituel. En somme, une contrainte qui devrait cantonner l'aile rigide à quelques exceptions, du moins dans un avenir proche.

L'avènement des voiles rigides, en particulier dans la 34e Coupe de l'America, a également mis l'accent sur un problème que les dessinateurs de voiles tiennent pour acquis. Autrement dit, leur tâche est beaucoup plus difficile que celle d'un dessinateur de coque ou de dérive. Ces derniers sont tous en quête de la forme optimale. Cependant, dans une large mesure, l'allongement et la déformation sont des paramètres inexistants pour le dessinateur des œuvres mortes. Certes, les foils peuvent fléchir, mais il existe des solutions simples pour remédier à ce problème. Les dessinateurs de voiles, eux, doivent en plus prendre en compte la flexibilité du matériau. Les voileries impliquées dans la conception de l'aile lors de la dernière Coupe pourraient largement ignorer ce facteur. En général, les dessinateurs doivent donner une forme à leurs foils en équilibrant les forces du vent, du mât et du bateau exercées sur les voiles, tout en s'assurant que la structure même de ces voiles résiste à la déformation. Les différentes voileries y parviennent aujourd'hui par divers moyens qu'on peut regrouper sous un même terme : la technique. Elles utilisent un petit éventail de matériaux tels que le polyester, l'aramide ou encore le carbone. Mais le procédé d'utilisation de ces tissus représente véritablement la gamme de choix sur le marché. Pour North Sails, le développement des tissus a conduit à trois procédés de fabrication brevetés : le 3DL, le 3Di et le Radian. Ces thèmes seront abordés dans la suite de ce livre.

VOLVO
OCEAN
RACE
Abu Dhabi
IWC
IWC

La science des voiles

Comprendre comment et pourquoi un voilier navigue au près est essentiel pour tous ceux et celles qui se considèrent comme des marins. Faute d'une base technique solide, le réglage des voiles s'apparente à des réflexes conditionnés. Mais assimiler les nombreux paramètres en voile n'est pas instantané. D'autres facteurs instables comme le vent, l'état de la mer et la présence de concurrents dans une course peuvent être déstabilisants pour tout navigant. Selon un vieux précepte, la plupart des marins peuvent optimiser leur potentiel dans un vent réel établi à 12 nœuds (TWS) et sur une mer plate. Mais, c'est dans les conditions extrêmes que les grands barreurs et régleurs de voiles excellent. Ce chapitre s'intéresse à la science des voiles, dont le fondement passe par la compréhension de l'interaction entre l'air et les profils.



L'image ci-dessus est une capture d'écran représentant l'écoulement d'air autour d'un bateau équipé d'une grand-voile à corne. Pourquoi cette voile est-elle plus efficace qu'une grand-voile triangulaire ? C'est l'un des premiers thèmes que nous explorons dans ce chapitre.

Ci-contre, la photographie met en évidence le « miracle » de la navigation au près, c'est-à-dire un savant mélange de physique, d'aérodynamique et de voilerie. Le voilier d'*Abu Dhabi* au lever du soleil à l'approche des côtes suédoises, étape finale de la Volvo Ocean Race 2014-2015 qui marque la victoire de l'équipe émirienne dans cette édition. (Photo Carlo Borlenghi/Volvo Ocean Race.)

Pourquoi ?

Vous vous êtes déjà demandé pourquoi sur tous les voiliers modernes la surface de la voile d'avant doit être réduite avant d'ariser la grand-voile ? Pourquoi les plans de voilure des bateaux de course et de croisière ont évolué vers des gréements fractionnés et des voiles plus allongées ? Pourquoi certaines formes de quilles, safrans et voiles sont appelées « sections laminaires » ? Pourquoi les marins cintrent et redressent un mât selon la vitesse et la direction du vent ? Pourquoi les architectes navals positionnent le mât, la quille et les safrans de sorte à rendre le bateau légèrement ardent ? Pourquoi des voiles avec un creux avancé rendent un voilier plus facile à barrer au près, mais pas forcément plus rapide ? Pourquoi les voiles dont le creux est reculé peuvent rendre un voilier plus rapide au près, mais aussi plus délicat à barrer ? Pourquoi il est avantageux d'être légèrement sous le vent de l'ensemble de la flotte et pas seulement par rapport au bateau sous lequel ou en avant duquel vous venez de virer ? Pourquoi l'ajout d'un rond de chute dans les hauts de la grand-voile améliore ses performances bien au-delà de la surface supplémentaire ?

Vous vous êtes déjà demandé pourquoi un bateau de course est plus exigeant à la barre qu'un bateau de croisière ? Pourquoi le vrillage des voiles est progressif (c'est-à-dire pourquoi le bord de fuite est conçu avec une augmentation du vrillage de bas en haut sous le vent) ? Pourquoi les voiles ont généralement plus de volume (creux plus important) en bas qu'en haut ? Pourquoi, au près, la grand-voile est toujours réglée à un angle plus fermé que le génois ?

Pourquoi le largue est l'allure la plus rapide pour un voilier ? Pourquoi le point de tire de la voile d'avant varie en fonction des allures ? Pourquoi certaines voiles d'avant ont une plage d'utilisation plus grande que d'autres ? Pourquoi vous ne devriez pas vous déplacer

lourdement sur un bateau lorsque la vitesse prime dans le petit temps ? Pourquoi une aile rigide est plus rapide qu'une voile souple ?

Notre objectif, dans ce chapitre et le suivant, est de poser les bases techniques pour comprendre les tenants et aboutissants de ces questions. Nous sommes convaincus qu'en répondant à ces interrogations diverses, vous améliorerez les performances de votre bateau, en course comme en croisière.

Un bateau qui remonte au vent – et d'ailleurs plus vite au près qu'en plein vent arrière dans presque toutes les conditions – est perçu comme un miracle. Et ce n'est pas faux. Le véritable miracle n'est pas tant la magnitude de la portance que la faiblesse de la traînée. Ces deux notions, portance et traînée, sont bien connues de la plupart des marins. Pour avoir une VMG positive (meilleur rapport cap/vitesse à la bouée au vent), un bateau nécessite une portance nettement supérieure à la traînée. En fait, le rapport portance/traînée est d'environ 8 à 10 pour 1 (L / D> 8). En outre, un bateau nécessite une certaine force pour contrebalancer la force latérale (moment de gîte) générée par l'interaction du vent sur le gréement et les voiles. Comme tout marin expérimenté sait ou ressent, cette force de redressement provient principalement de la quille ou de la dérive ainsi que du safran. Il s'agit d'une partie du puzzle que nous explorerons dans le chapitre 4.

Comment et pourquoi un bateau génère plus de portance au près ? Et pourquoi cette force est bien plus élevée que la traînée ? Il existe de nombreuses, peut-être trop nombreuses, théories. Certaines se chevauchent, d'autres se contredisent et quelques-unes relèvent à peine de la pratique de la voile. L'une des explications est que les bases de l'aérodynamique reposent sur des notions mathématiques et physiques complexes qui dépassent le cadre de réflexion des sciences dites générales. Notre premier aérodynamicien a vécu il y a environ 300 ans, bien avant l'existence du terme aérodynamicien. Cet homme était Sir Isaac Newton (1642-1727). D'autres, avant et après lui, incluent Ludwig Prandtl, Daniel Bernoulli, Leonhard Euler, Martin Kutta, Nikolai Zhukovsky, Henri Coanda, Archimède et Léonard de Vinci. Sans la connaissance de leurs contributions individuelles, la véritable compréhension des tenants et des aboutissants du réglage des voiles en vue d'atteindre la performance optimale serait incomplète.

L'événement déclencheur dans l'aérodynamique date du 17 décembre 1903, le jour où les frères américains Wright ont bouleversé notre monde en effectuant le premier vol motorisé en avion d'une durée de 59 secondes sur une distance de près de 260 mètres. Avant cet épisode, la traînée était un paramètre quasiment ignoré des mathématiciens et physiciens qui sont à l'origine d'une grande partie des connaissances aérodynamiques actuelles. Aujourd'hui encore, de nombreux aérodynamiciens, architectes navals et dessinateurs de voiles analysent les profils aérodynamiques pour les voiles de près dans un environnement bidimensionnel (2D), c'est-à-dire un contexte où la traînée est limitée voire inexistante. Cette méthode est plus rapide et plus efficace qu'une analyse dans un environnement tridimensionnel (3D) où la traînée induite doit être prise en compte. Même si la traînée ne représente que 10 à 15 pour cent de la portance, elle demeure un élément majeur. En tant que telle, elle doit être entièrement modélisée et appréhendée. Le passage relativement rapide de l'analyse 2D à l'analyse 3D témoigne de l'œuvre révolutionnaire de nos illustres aérodynamiciens. Portance, traînée, écoulement, autant de sujets que nous allons nous approprier dans ce chapitre.

Effets visqueux

Dans le monde réel, le phénomène de friction existe. En physique, on parle d'effet visqueux. La non-viscosité décrit un environnement sans frottement. Sans écoulement visqueux, la traînée n'existerait pas. Et, sans traînée, la portance ne serait pas suffisante pour faire voler un avion ou faire remonter un voilier au vent.

La viscosité est la mesure de résistance d'un fluide au cisaillement. À différents fluides correspondent des viscosités différentes. On pourrait nommer cette propriété caractéristique de masse. L'eau est en effet plus lourde que l'air. Elle a une viscosité plus élevée et possède une plus grande inertie. Par conséquent, l'eau résiste davantage au cisaillement ou à la séparation autour d'une quille que l'air autour du même profil. Soulignons ici un point

essentiel pour les marins, à savoir que l'air chaud qui se déplace lentement présente moins de viscosité et de densité que l'air froid en mouvement rapide. Pour cette raison, les régleurs expérimentés règlent leurs voiles différemment selon la température pour une vitesse de vent réel (TWS) identique.

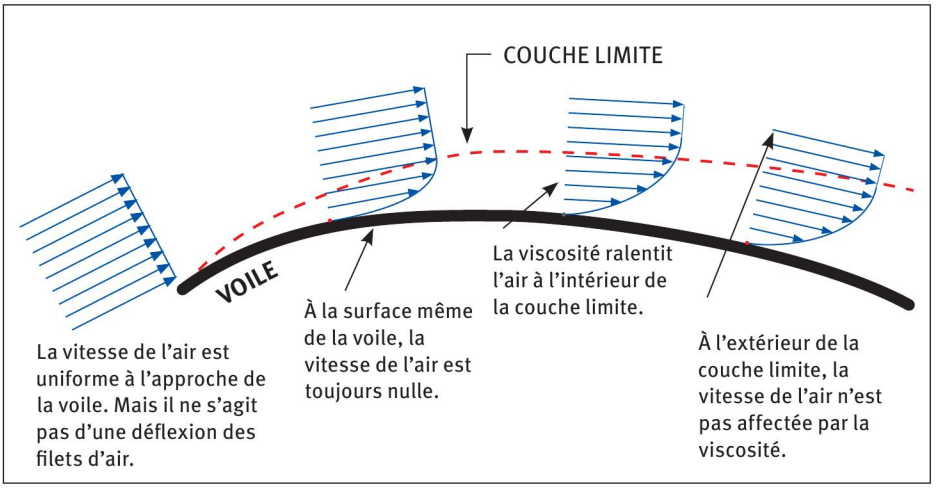


Figure 3.1 Écoulement de la couche limite.

Frottement et traînée

Pour expliquer ce qui semble être deux termes simples – frottement et traînée –, il nous faut introduire un membre de notre groupe du début du XX^{e} siècle. Il s'agit du physicien allemand Ludwig Prandtl. Lui et ses étudiants ont joué et continuent à jouer un rôle crucial dans l'aérodynamique[1]. Les contributions de Prandtl peuvent être divisées en deux parties. Avant les frères Wright, Prandtl a montré l'existence et la mesure de la couche limite, une couche de fluide « liée » à la surface au-dessus de laquelle ce fluide passe. Dans le cas des voiles, ce fluide est l'air ; dans le cas des quilles et des safrans, c'est l'eau. Pourquoi cette couche limite existe-t-elle ? En raison de la viscosité. À la surface même du profil, la vitesse de l'air passant au-dessus est nulle. En effet, la couche adhère à la surface qui entraîne cette même couche sous l'action de la friction. Chaque couche successive microscopique accélère jusqu'à ce que, sur le bord extérieur de la couche limite, la vitesse soit égale à celle de l'écoulement libre (fig. 3.1). En dehors de la couche limite, l'écoulement est non visqueux. Autrement dit, l'effet de frottement sur ce profil est nul.

Écoulement laminaire et turbulent

Au sein d'une couche limite, il existe deux types d'écoulements : laminaire et turbulent. Ces termes sont plutôt descriptifs (fig. 3.2). Un état laminaire décrit un empilement de couches régulières avec un minimum de friction entre elles. Dans un écoulement turbulent, comme son nom l'indique, les couches se mélangent, les molécules s'agitent et se déplacent à des vitesses différentes dans des directions différentes. L'écoulement est alors perturbé. Malgré cette description qui semble chaotique, la traînée totale transmise sur le profil provenant d'un écoulement turbulent dans la couche limite est tout à fait bénigne. Cela dit, comme le frottement est plus important, la traînée de frottement est plus élevée qu'à l'intérieur des couches régulières du flux laminaire.

Dans le cadre de notre discussion sur le miracle de la navigation au près, ce qui importe n'est pas tant de savoir si l'écoulement est laminaire ou turbulent, mais plutôt si ce flux accélère ou décélère. Un écoulement turbulent qui accélère génère une inertie suffisante pour compenser le mélange des couches, tandis qu'un écoulement qui ralentit, qu'il soit turbulent ou laminaire, constitue une entrave à la vitesse du bateau et complique la tâche pour les régleurs de voiles. Pour comprendre pourquoi, il faut s'intéresser à la traînée de séparation, qui, comme son nom le suggère, est un écoulement séparé. C'est la couche limite de Prandtl qui s'est détachée de la surface du profil pour rejoindre l'écoulement libre. Elle naît sous forme de bulle. Si la bulle de séparation se développe, le résultat est un décrochage, c'est-à-dire une séparation complète de l'écoulement de la voile le long du côté sous le vent. En cas de décrochage, un voilier ralentit ; un avion peut chuter. Comme nous

1 En 1904, Ludwig Prandtl (1875-1953) publia ses premiers travaux, mais ils furent ignorés par la majorité de ses pairs. Il a fallu attendre jusqu'en 1921 quand un étudiant de Prandtl publia une équation basée sur ses recherches, et qui fut diffusée au sein de toute la communauté scientifique.

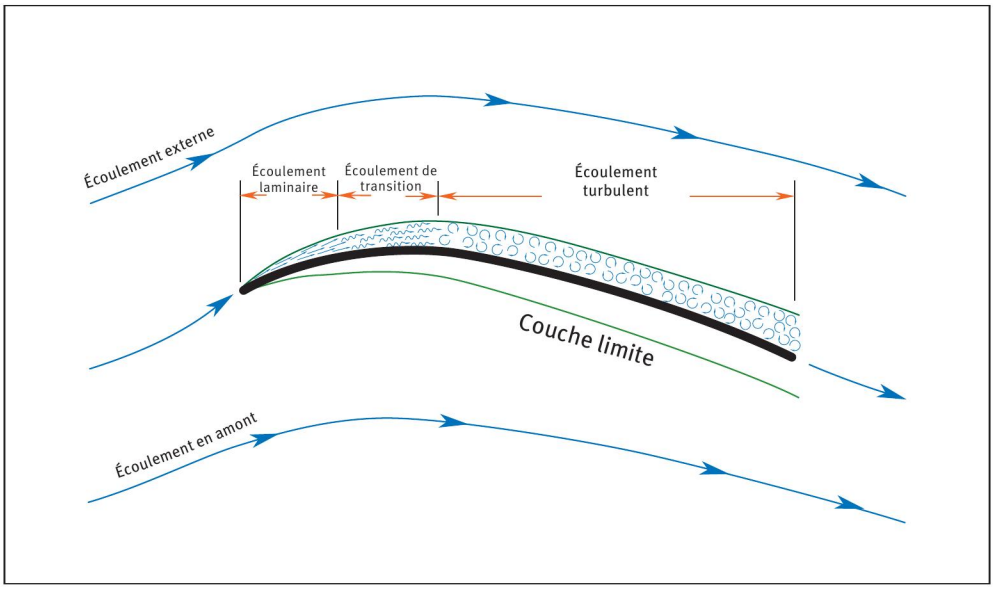


Figure 3.2 Zones d'écoulement dans la couche limite.

le verrons ci-dessous, l'écoulement qui décroche, et donc l'écoulement de la traînée de séparation, est directement lié à l'angle d'attaque : l'angle entre la corde (une droite virtuelle qui relie le guindant à la chute) du profil et l'écoulement en amont. Les lois de la physique régissant les écoulements qui accélèrent ou ralentissent nous permettent de comprendre l'aspect technique du miracle de cette faible traînée totale au près.

Les deux grandes catégories de traînées de séparation sont la traînée de séparation au bord d'attaque et celle au bord de fuite. La première se forme sur le bord d'attaque de la voile et, quand les conditions sont réunies, se propage vers l'arrière le long de cette surface sous le vent. La bête noire des marins ! La deuxième est la plus répandue et commence au bord de fuite, c'est-à-dire sur la chute de la voile, et s'étend vers l'avant jusqu'à ce que, une fois les conditions réunies, la totalité de la surface décroche. Rien de bon une fois de plus.

Dans le monde réel, il existe toujours une certaine traînée de séparation qui provient de la bulle de séparation ; celle-ci stagne normalement en avant du mât et sur le bord avant de la grand-voile sous le vent. Si vous naviguez trop abattu avec la voile bordée au maximum, cette bulle et sa traînée correspondante augmentent jusqu'à ce que toute la voile décroche. Il en va de même pour la bulle de bord de fuite. À l'exception peut-être de quelques conditions stables, on trouvera toujours certaines de ces bulles autour de la chute.

Remarquons que, dans la réalité des voiles, l'écoulement laminaire présente peu d'intérêt, en partie parce qu'il est quasiment inexistant. D'ailleurs, il n'est pas souhaitable la plupart du temps. Comment est-ce possible alors ? Je passe des heures à polir soigneusement la carène de mon bateau. Et je crains que les plis sur ma voile n'engendrent du frottement. Même si ce point s'éloigne du cadre de ce livre, nous pensons que passer des heures à polir la coque de son bateau est une perte d'énergie énorme (avec un grain de 300, et d'autant plus avec du 600). Mieux vaut s'assurer de la régularité de la surface. Quant aux voiles, il ne sert à rien de s'inquiéter de l'état de leur surface et de s'évertuer à les rendre plus lisses pour favoriser un écoulement laminaire. Pourquoi ? D'une part, parce qu'il est presque impossible d'obtenir un écoulement laminaire sur les voiles. D'autre part – et surtout – parce qu'un écoulement laminaire peut se détacher pour devenir un écoulement séparé plus facilement que ne le peut un écoulement turbulent, et particulièrement quand il décélère. Certes, un écoulement turbulent crée plus de traînée de frottement qu'un écoulement laminaire. Pourtant, l'augmentation de la traînée de frottement est minime par rapport à l'accroissement de traînée causé par un écoulement séparé. Le point essentiel à retenir ici est qu'un écoulement turbulent résiste mieux aux ralentissements qu'un écoulement laminaire. Par conséquent, il retarde le moment où la couche limite se sépare de la surface de la voile. On peut en déduire la signification d'une section laminaire pour une quille ou un safran. C'est une forme de profil qui retarde le passage d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent aussi longtemps que possible.

Pour des raisons que nous détaillerons en temps voulu, une section laminaire aurait son maître bau plus reculé, dans le but d'accélérer le flux sur une plus grande portion du profil. Cela dit, de nombreux architectes navals évitent les sections laminaires pour les safrans de voiliers modernes. Contrairement aux quilles, les safrans sont soumis à des mouvements constants, ce qui implique des changements rapides d'angle d'attaque. Ce phénomène accroît considérablement la probabilité d'écoulement séparé avec une section laminaire, si cet angle d'attaque augmente beaucoup ou trop vite.

Rappelez-vous, c'est dans la zone d'écoulement ralenti – les sections arrière d'un profil – qu'un écoulement turbulent est souhaitable. L'objectif est de reculer au maximum ce flux séparé. Cela est vrai pour les voiles ainsi que pour la plupart des safrans. Les petits profils de forme étrange positionnés sur le dessus de certaines ailes d'avion sont un exemple concret. À première vue, on pourrait supposer qu'ils créent beaucoup de traînée de frottement. Et c'est le cas. Mais pour la raison ci-dessus, ils ont une fonction utile, celle d'agir en tant que « turbulateurs » (générateurs de tourbillons dans le jargon) afin de changer l'écoulement de couche limite d'un état laminaire à un état turbulent. Comme la traînée d'écoulement séparé est plus nuisible que l'écoulement turbulent, leur rôle est de mieux gérer la décélération de l'écoulement à l'approche du bord de fuite de l'aile. Dans le cadre des voiles, une autre raison d'ignorer l'écoulement laminaire est que, même s'il existait, on ne pourrait le discerner. Des penons qui flottent parallèlement sur une voile ne sont pas le fait d'un écoulement laminaire. Il s'agira dans presque tous les cas – à l'exception de quelques brefs moments – d'un écoulement turbulent. Vous saisissez désormais les raisons de son existence. Il vous reste à espérer que le phénomène se produira.

Traînée induite

La traînée induite est de loin la plus importante et la plus pénalisante des traînées pour la performance en voile. C'était une notion aérodynamique qui n'avait pas été comprise à l'époque où les frères Wright expérimentaient leur vol en 1903. Mais cinq ans plus tard, Ludwig Prandtl développa à la fois la théorie pour comprendre la traînée induite et la méthode numérique pour la calculer avec précision[2]. Il nomma sa théorie *la ligne portante* – sa deuxième contribution majeure dans l'aérodynamique. La cause profonde de la traînée induite est le changement de la direction de l'écoulement d'air engendré par le profil. Dans le cas des ailes d'avion, le changement s'opère vers le bas ; dans le cas d'une voile, il se produit au vent. Le changement de direction de l'écoulement, comme nous le verrons en détail ci-dessous, marque le début du phénomène de portance. Ainsi, la traînée induite découle directement de la création de portance et est proportionnelle au carré de la portance. En termes plus techniques, la traînée induite reflète la variation du coefficient de portance (Cl) sur l'envergure. Autrement dit, les différences de portance à travers ou sur la surface totale d'une voile ou d'une aile produisent une traînée induite. Rappelez-vous nos conseils sur le carénage de la coque ou de la quille de votre voilier avant le polissage. Les bosses et les creux entraînent des vitesses variables de l'eau (accélérations et décélérations) sur la surface. Ces variations de vitesse génèrent à leur tour des pressions variables, c'est-à-dire un Cl variable. Par conséquent, une surface irrégulière favorise la traînée induite. Nous reviendrons sur ce point.

À quel point importe-t-il de réduire la traînée à l'extrémité d'une aile ? Les avions Boeing 737 sont équipés d'ailerons appelés « Winglets Split Scimitar » par les fabricants. Ces ailerons, qui ont pour fonction de diminuer la traînée induite, auraient permis à la compagnie d'économiser 55 millions de litres de carburant par an. (Photo Michael Levitt.)

Comment se définit concrètement la traînée induite sur un voilier ? En supposant que le bateau soit bien réglé (gréement et voile), près de 80 pour cent de la surface totale des voiles va subir un Cl relativement constant ; il en résulte un faible changement de portance le long de cette portion de l'envergure. La traînée induite est minime. À ce stade, la traînée de séparation est potentiellement plus pénalisante. Cependant, sur 20 pour cent de la surface située vers le bord de fuite, la vitesse d'écoulement diminue rapidement, la portance également. Les variations rapides du Cl se traduisent par une traînée induite significative, en partie sur la chute, le long de la têtière et de la bordure. Cette traînée induite constitue la grande majorité de la traînée totale. La traînée induite est proportionnelle à la portance, comme nous le verrons. Si on recherche trop de portance, on obtient trop de traînée et un rapport L/D moins favorable[3]. Comme décrit ci-dessus, un moyen d'augmenter la portance

2 Frederick W. Lanchester (1868-1946) développa indépendamment une théorie similaire en 1907. C'est pourquoi la théorie de *la ligne portante* est souvent nommée « théorie de l'aile de Lanchester-Prandtl ».

3 Un aérodynamicien serait rebuté par une telle déclaration. Le problème est bien plus complexe car la vitesse ultime au près ne se résume pas à la simple relation entre la portance et la traînée. La force latérale, le moment de lacet et le moment de roulis jouent également un rôle très important dans cette dynamique. Cependant, à ce stade, notre objectif est d'en comprendre les bases.

L'exemple le plus célèbre d'ailettes sur une quille était sur *Australia II*, conçu par le regretté Ben Lexcen (ci-dessus, en haut), qui a remporté la Coupe de l'America en 1983, le premier bateau non originaire des États-Unis à gagner le trophée. Le 12 Mètres avait un tirant d'eau d'un peu plus de 9 pieds, tel que la jauge l'imposait. De ce fait, une quille à fort allongement de faible traînée n'était pas envisageable. En plus de réduire la traînée induite, les ailettes étaient également conçues en plomb pour minimiser la gîte. (Photo Dan Nerney.)

Ci-dessus, en bas, le voilier *Rambler 88*, propriété de George David, mis à l'eau en 2014, équipé d'une quille basculante de fort allongement et au moins deux fois plus profonde que celle d'*Australia II*. À noter également les deux dérives et les doubles safrans. (Photo Daniel Forster.)

est d'augmenter l'angle d'attaque, c'est-à-dire la différence angulaire entre la corde de la voile et la direction du vent apparent (AWD). L'angle d'attaque moyen pour un bateau de course haute performance est de 17-18 degrés (l'angle de vent apparent moins l'angle d'écoute est égal à l'angle d'attaque). Si, par exemple, l'angle d'attaque atteint 22 degrés, la portance augmente, mais la traînée – surtout la traînée induite – augmente d'autant plus.

Il existe deux variantes de la traînée induite. L'une est la traînée induite sur le bord de fuite du profil. Sur une voile, il s'agit de la chute. Ce sont des tourbillons tournant dans le sens antihoraire depuis ce bord de fuite. Les penons sont un bon indicateur de leur présence. L'autre variante est le tourbillon marginal. Sur un avion, ces tourbillons circulent aux extrémités des ailes ; sur une voile, en tête et sur la bordure. Il y a une différence de pression, ou delta, entre le côté sous le vent de la voile et celui au vent. La nature abhorre les deltas de pression. C'est pour cette raison que le vent existe. Et c'est la raison pour laquelle l'écoulement sur le côté en surpression d'une voile veut s'échapper au-dessus ou à l'extrémité pour équilibrer cette pression.

Les avions sont munis d'ailettes pour minimiser la traînée induite des tourbillons marginaux. Les architectes navals ajoutent parfois des ailettes sur l'extrémité de la quille pour le même motif (l'exemple le plus célèbre est *Australie II* lors de la Coupe de l'America de 1983). Quant aux voiles, la solution est moins évidente. Il faut avant tout repérer quel type de traînée induite est le plus nuisible : les tourbillons à l'extrémité ou sur le bord de fuite ? Les tourbillons à l'extrémité sont les pires. Les aérodynamiciens troqueraient bien la traînée induite sur le bord de fuite contre celle à l'extrémité. On comprend alors pourquoi le groupe des premiers aérodynamiciens utilisait une aile d'envergure infinie dans ses calculs. Avec cette petite astuce et l'hypothèse raisonnable d'un Cl constant selon l'envergure, ils excluaient la traînée induite de leurs modèles mathématiques, ce qui les simplifiait.

Les fameuses ailes de l'avion Spitfire – auxquelles on attribue la victoire de la bataille d'Angleterre en 1941 et qui ont inversé le cours de la Seconde Guerre mondiale – étaient un tournant dans l'aérodynamique (fig. 3.3). Les extrémités arrondies, et non carrées, des ailes de ce bombardier ont contribué à augmenter la vitesse et à améliorer la manœuvrabilité pour une poussée de moteur donnée. Depuis, cette forme est devenue le modèle de référence pour toutes les ailes d'avion qui ont suivi. Arrondir les extrémités des ailes a permis d'égaliser de manière plus progressive le delta de pression et d'obtenir un Cl plus constant sur toute l'envergure du profil. En voile, afin de se rapprocher de la forme elliptique de Spitfire, les designers ont ajouté du rond de chute sur les grands-voiles, et même sur les focs. Les grands-voiles triangulaires ont évolué vers des voiles à corne. Nous étudierons ces formes dans les chapitres suivants.

Si vous jugez que les théories des penseurs tels que Prandtl, Bernoulli, Newton, Euler, Kutta, Zhukovsky, Archimède et de Vinci sont désormais dépassées, considérez ceci : depuis que ces théoriciens ont créé les fondements de l'aérodynamique notamment au début du XX^{e} siècle, aucun autre élément majeur n'a été apporté à cette base théorique. Certes, avec l'avènement de l'ère numérique, nous pouvons mieux appréhender les phénomènes de portance et de traînée et mesurer leurs effets avec une meilleure précision. Pourtant, toute notre compréhension aujourd'hui repose sur les épaules de ces scientifiques. L'explication des tenants et aboutissants de l'aérodynamique soulève un débat bien plus animé et parfois

enflammé que tout autre sujet dans la voile. Mais, à présent que nous sommes plus à même de comprendre les rudiments du phénomène d'écoulement, nous allons tenter de donner un sens à tout cela. Quitte à ce que nos propos alimentent le débat éternel.

« Une voile est comme une aile d'avion. » Si vous avez manqué cette leçon au début de votre carrière dans la voile, vous en avez probablement entendu parler au cours de sciences en sixième : « Un avion vole parce que l'air qui passe sur la surface courbe supérieure de ses ailes doit parcourir une distance plus longue que l'air qui passe sous la surface inférieure plate. Et comme l'air qui passe au-dessus doit parcourir un chemin plus long, il doit aussi aller plus vite pour atteindre le bord de fuite au même moment que l'air qui passe en dessous. Cette différence de distance provoque une différence de vitesse qui provoque une différence de pression : une dépression sur la face supérieure (extrados) de l'aile (sous le vent de la voile) et une surpression sur la face inférieure (intrados) de l'aile (au vent de la voile). » Selon Bernoulli, cette zone de dépression sous le vent crée une portance ou une aspiration. Sur un avion, la portance est verticale. Sur un voilier, elle est horizontale. Depuis l'apparition des hydrofoils, notamment dans la spectaculaire 34e Coupe de l'America à San Francisco, les foils créent une portance verticale alors que l'aile (rigide) et le foc créent une portance horizontale.

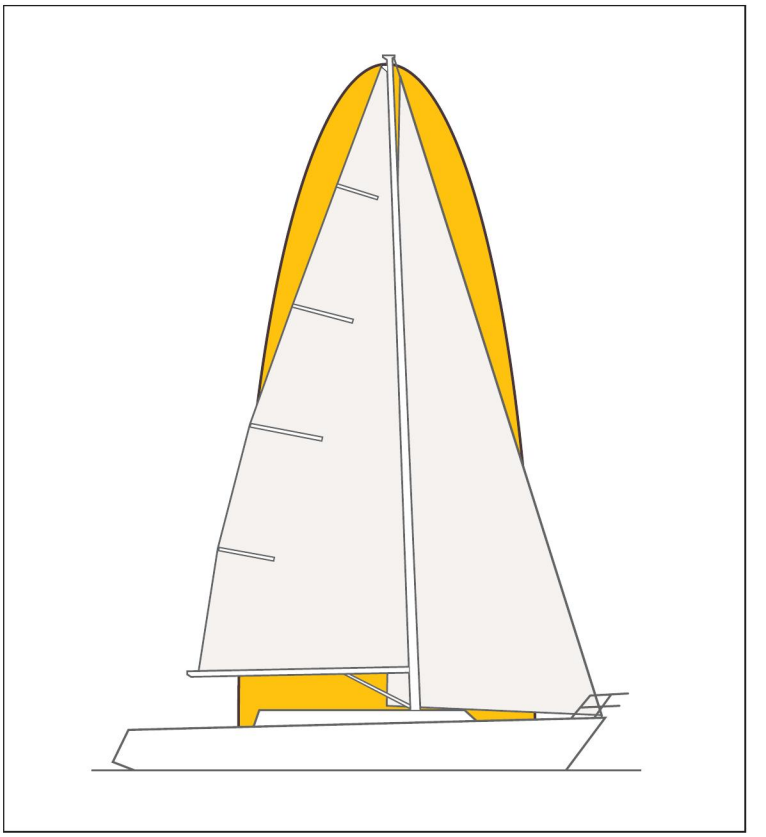


Figure 3.3 Dessin d'une grand-voile triangulaire traditionnelle superposée sur une aile de type Spitfire, qui a contribué à la victoire de la bataille d'Angleterre en 1941. Oui, une voile « est comme une aile d'avion », et c'est le rond de guindant qui lui confère sa forme plus en U qu'en V. La grand-voile à fort rond de chute, très répandue aujourd'hui, constitue une autre étape dans le continuum.

De toute évidence, il y a aussi de la traînée. Cependant, si l'on considère un rapport L/D 8:1 ou 10:1, un Airbus 380 de 400 tonnes est capable de décoller de la piste avec seulement 40 tonnes de poussée moteur. Cette théorie possède tous les ingrédients d'une bonne explication : elle est claire, simple, logique et fondée sur des principes physiques connus et acceptés de tous : *le principe de Bernoulli* qui tire son nom de Daniel Bernoulli (1700-1782). Ce médecin et mathématicien suisse a fourni les fondements techniques liés à cette explication. Son père, Johann Bernoulli, était un des premiers développeurs de calculs. Le jeune Bernoulli a étudié l'écoulement des fluides : la relation entre la vitesse d'un fluide et sa pression. Ses travaux sur le sang ont servi de base de référence pour les mesures de la pression sanguine en Europe pendant les 170 années suivantes. La méthode de Bernoulli est également utilisée pour mesurer la vitesse d'un avion dans l'air.

En 1738, Bernoulli énonçait son théorème selon lequel lorsque le débit d'air accélère, la pression diminue, et, inversement, lorsque le débit d'air ralentit, la pression augmente. Cependant, il n'a pas tenté d'expliquer pourquoi cette vitesse augmente au-dessus d'une aile et diminue sur sa face inférieure. Certains se contentent de la théorie de Bernoulli pour résoudre la question. Mais il reste pourtant cette petite vérité agaçante et incommodante : les avions peuvent voler à l'envers. Oups ! Cela insinue qu'une planche plate, correctement inclinée dans l'écoulement de l'air, créerait une portance suffisante pour surmonter la traînée et propulser votre voilier au près. En réalité, comme nous le verrons, cela est vrai, mais pas recommandé. Si la théorie de Bernoulli ne vous satisfait pas, penchez-vous sur celles de Sir Isaac Newton. Ses deuxième et troisième lois du mouvement sont parfois évoquées pour expliquer le vol : « La force résultante sur un objet est égale à sa variation d'inertie » et « pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée ». Quand le profil modifie l'écoulement d'entrée, cet écoulement est forcé vers le haut ou sous le vent, puis vers le bas ou au vent. La réaction verticale (ou portance) doit être égale, selon la physique newtonienne, à la variation de l'inertie de l'air vers le bas. Ce sont les phénomènes d'action-réaction que nous avons étudiés à l'école. En d'autres termes, c'est le changement de la direction du vent qui crée une force de portance. Combinée à la quille sur un voilier ou à la poussée générée par le moteur sur un avion, cette force permet au voilier de remonter au vent et à l'avion de voler. Il faut garder à l'esprit que l'aile soulève l'avion contre la force de gravité, tandis que la voile propulse le bateau au vent.

Oracle naviguant au vent, et *Emirates Team New Zealand* volant sur ses foils au près durant la 34e Coupe de l'America à San Francisco en 2013. L'aile et la voile d'avant créent une portance horizontale tandis que les hydrofoils génèrent une portance verticale. *Emirates Team New Zealand* a établi un record de course de 47,58 nœuds dans 21,8 nœuds de vent le 24 septembre 2013. C'est 2,2 fois la vitesse du vent. (Photo Gilles Martin-Raget photo / © ACEA.)

Comme le principe de Bernoulli, la loi de Newton s'appuie sur la logique et la physique. En fait, c'est une explication crédible de cet avion sur la photo volant à l'envers. L'air est toujours dévié vers le bas, créant ainsi une portance. Cependant, le problème est que cette portance générée, provenant de la force verticale dans le cas d'un avion ou de la force au vent dans le cas d'un voilier, est loin d'être suffisante pour atteindre le rapport L/D 8 :1 ou 10 :1 requis, comme le montre la littérature dans ce domaine. En apparence, Bernoulli et Newton nous laissent sur notre faim. Il doit y avoir d'autres raisons.

Nouvelle approche de l'aérodynamique

L'heure est venue de présenter deux autres membres de notre groupe de physiciens éminents : Martin Wilhelm Kutta et Nikolai Joukovski. Pour ce faire, Arvel Gentry sera notre guide initiateur. Cet aérodynamicien américain et chercheur en aérodynamique chez Boeing a appliqué les principes aérodynamiques de son quotidien à sa passion de la voile[4].

En 1973, Gentry s'attela à rectifier toutes idées et théories qu'il considérait comme fausses ou incorrectes sur comment et pourquoi un voilier peut remonter au vent. Il

4 La participation de Boeing dans la voile débuta officiellement en 1981, lorsque le skipper Dennis Conner sollicita l'assistance d'Arvel Gentry auprès de la compagnie aérienne dans sa défense de la Coupe de l'America de 1983. Boeing créa l'Institut de recherche en vol (FRI) pour permettre à la fois à ses ingénieurs et aux ingénieurs externes de travailler durant leur temps libre sur des missions détachées et approuvées. La compagnie mit à disposition ses ordinateurs et ses programmes informatiques de pointe à cet effet. Un des résultats de cette collaboration, qui incluait entre autres l'entreprise 3M, étaient les fameux « riblets », un revêtement antifriction rainuré et strié que l'on pouvait apercevoir sur les coques des voiliers de la Coupe de l'America en 1987 (*Stars & Stripes*), sur les bobsleighs olympiques et les vols à propulsion humaine. Les « riblets », parfois appelés « peau de requin », ont été aussitôt interdits dans la voile.

réussit à anéantir de nombreux mythes dans les colonnes de *Sail Magazine*, nouvelle publication d'alors désormais très respectée.

L'effet de fente est probablement le mythe le plus célèbre qu'il a mis à mal. Selon ce mythe, le flux d'air passant dans le couloir entre le foc et la grand-voile est ainsi accéléré, générant un écoulement plus rapide et, par conséquent, une pression encore plus faible sous le vent de la grand-voile. La plupart des lecteurs de plus de cinquante ans admettront probablement avoir appris ou du moins lu quelque part à leurs débuts en voile ce vieux précepte sur l'air revitalisé dans la fente. Cela peut sembler anecdotique. Gentry se décrit comme « étant simplement un messager ». Néanmoins, nul ne doute que sa lumière sur les connaissances scientifiques déjà existantes ait permis une plus grande compréhension sur le comportement d'un voilier au près.

Les articles de Gentry furent qualifiés de « darwinisme de la voile », comme on pouvait le lire plus tard dans les pages du magazine *Sailing World* citant un extrait de ce chapitre de la première édition de ce livre. Au bout d'un an en 1973, au terme d'une série d'articles de Gentry, d'autres théories en vogue censées expliquer la voile s'écroulaient. Dès le début, il y avait matière à controverse. Aujourd'hui, la quasi-totalité de la littérature sur ce sujet a évolué. L'aérodynamique n'est pas une science intuitive, affirmait Gentry. « C'est un sujet très compliqué, et même les aérodynamiciens les plus qualifiés ont tendance à se spécialiser dans quelques domaines pointus tels que les systèmes hypersustentateurs, la mécanique des fluides numérique (CFD), la stabilité, le contrôle, etc. Cependant, il n'y a aucune polémique quant à la portance générée sur un profil aérodynamique. Ce phénomène a bien été compris par les aérodynamiciens depuis de nombreuses années. »

Ci-dessus, en haut, le Squadron de démonstration aérienne de l'USAF, alias « Thunderbirds », effectue une figure Calypso Pass ou image miroir, prouvant entre autres que les avions peuvent voler à l'envers. (Photo US Air Force/Sgt. Richard Rose Jr.)

La photo du bas montre un Airbus A380-800 atterrissant à l'aéroport international de Los Angeles. Il s'agit du plus grand avion civil au monde. Pourtant, cet engin de 400 tonnes peut décoller avec seulement 40 tonnes de poussée moteur. (Photo par Dura-Ace sous la licence générique Creative Commons Attribution Share Alike 2.0.)

De nombreuses années : c'est-à-dire 100 ans !

Gentry s'était donné pour mission d'expliquer l'interaction complexe du vent sur les voiles à un public de voile sceptique à l'époque. Il a commencé avec un traceur de champs analogique. Ce dispositif lui permettait de dessiner avec précision les lignes de courant autour des sections de voile. Les lignes de courant indiquent la direction du flux d'air et sa vitesse relative dans le champ d'écoulement en différents points. Cela est important, concluait-il, car de nombreux livres de voile contenaient des explications et conclusions erronées, élaborées à partir de schémas dessinés à la main manifestement incorrects. L'étape suivante consistait à réaliser une simulation numérique de ces mêmes profils à l'aide d'un programme de calcul aérodynamique de profils multi-éléments (l'ancêtre de la

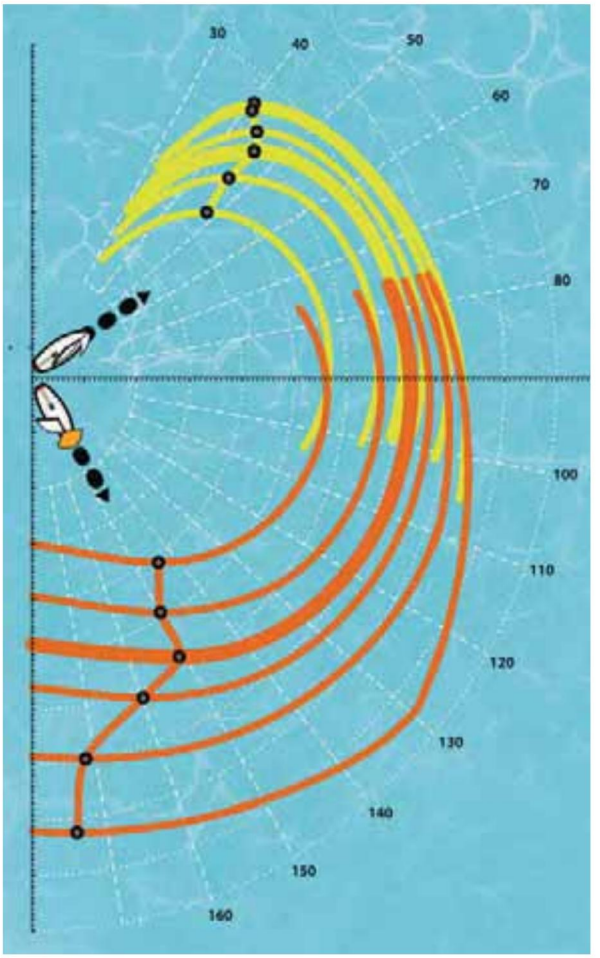


Figure 3.4 Un diagramme polaire est une représentation graphique des vitesses anticipées d'un bateau, élaborée à partir d'un programme VPP (*Velocity Prediction Program*) à toutes les allures. Les lignes pointillées circulaires représentent la vitesse croissante du bateau, tandis que les lignes droites pointillées indiquent l'angle du vent réel (TWA). Les lignes jaunes et orange illustrent les vitesses du bateau à plusieurs vitesses de vent données depuis des allures de près (verticales) aux allures de largue (horizontales). Les points VMG sont les plus significatifs, à la fois au près et au portant, représentés par les points noirs et les lignes qui les relient (jaune pour la VMG au près et orange au portant). Notez que chaque point sur les lignes colorées épaisses indique la vitesse et l'angle optimaux en direction de la bouée au vent / sous le vent. Dans le petit temps au portant, les angles VMG optimaux de ce bateau varient entre 143 et 151, tandis que dans le gros temps, ils dépassent les 170. Cela suggère que le bateau modélisé est ancien et à déplacement élevé, ne lui permettant pas de planer dans la brise comme le font les bateaux plus modernes. Ainsi, sa route, la plus rapide vers la bouée sous le vent dans ces conditions, serait plein vent arrière. Les bateaux de course modernes naviguent rarement au-delà de 155 TWA au portant quelles que soient les conditions. (Gracieuseté de US Sailing.)

CFD). L'ordinateur calculait encore plus précisément les lignes de courant, et fournissait également les vitesses résultantes ainsi que les distributions générées par ces formes de voile. Enfin, une série d'études a été menée sur un canal d'eau à l'université de Long Beach State en Californie.

Définissons à présent quelques termes. Les distributions de pression, comme l'expression le suggère, se réfèrent aux différentes pressions sur les surfaces du profil. Nous avons abordé ce point dans notre discussion antérieure à propos du Cl sur l'envergure d'une aile ou d'une voile. La pression est inversement proportionnelle à la vitesse de l'écoulement. Plus la vitesse de l'écoulement augmente, plus la pression diminue. De ce fait, la distribution de ces pressions sera non seulement différente entre l'intrados (au vent) et l'extrados (sous le vent), mais aussi sur un même côté de la voile.

Le second terme CFD, la mécanique des fluides numérique (*Computational Fluid Dynamics* en anglais), fait référence à une simulation informatique de l'écoulement du fluide autour d'un profil, que ce soit une voile, une quille, un safran ou une coque. Un logiciel de CFD calcule la distribution de la pression. Loin d'être un exercice trivial, une seule simulation nécessite des milliers de points de calcul pour produire un diagramme polaire précis pour un voilier, soit un résumé graphique des vitesses calculées pour ce bateau en fonction de la direction et de la vitesse du vent (fig. 3.4). Typiquement, il existe deux catégories de code CFD : l'une pour l'aérodynamique, et l'autre pour l'hydrodynamique. À ce stade de l'ouvrage, les raisons de traiter ces deux catégories de façon distincte devraient être claires. Les différents angles d'attaque et viscosités des deux fluides justifient cette distinction. Rappelons qu'un angle d'attaque pour une voile typique au près se situe entre 17 et 19 degrés, celui de la quille correspond à l'angle de dérive, généralement 2 ou 3 degrés au près. Et enfin, l'angle de safran équivaudrait à la somme de l'angle de dérive et de l'angle de barre requis pour compenser un comportement légèrement ardent et atteindre un total d'environ 5 ou 6 degrés.

Décollement d'une plaque plane

Précédemment, nous avons constaté qu'une plaque ou planche plane pouvait engendrer une portance suffisante pour faire voler un avion. Avec l'aide de Gentry, nous allons faire voler cette plaque plane. On peut la considérer comme un profil aérodynamique dont les deux faces supérieure et inférieure auraient une longueur égale. Si nous parvenons à faire voler ce profil basique, nous parviendrons aisément à ce qu'une aile sustente un avion ou une voile propulse un bateau au près. En outre, à ce stade de la discussion, en utilisant une plaque plane, on se dégage des complexités supplémentaires que comporte une forme tridimensionnelle et qui ne sont pas faciles à appréhender (creux, vrillage, etc.). Nous nous facilitons la tâche tout comme les premiers aérodynamiciens l'ont fait.

Le vent a une certaine énergie, et c'est le vent qui alimente le phénomène de ce qui est communément appelé portance. Nous savons que les aérodynamiciens considèrent l'air comme un fluide tout comme l'eau. Ainsi, les lois de la mécanique des fluides s'appliquent à la fois à l'eau et à l'air. Comme l'a montré Prandtl, en raison de la viscosité, le flux d'air au contact de la voile s'y accroche et aura une vitesse relative nulle (fig. 3.1). Au-dessus de cette couche d'air passe un second flux d'air qui se déplace légèrement plus rapidement que le premier, et ainsi de suite. Il s'agit de ladite couche limite. La figure 3.2 montre ce que l'on définit parfois par couche de cisaillement : la variation de la vitesse d'écoulement par rapport à la surface. On retrouve ce type de traînée de friction de surface sur les voiles, les coques et les quilles.

Positionnons maintenant notre plaque selon un certain angle par rapport à l'écoulement. C'est notre angle d'attaque. Dans le monde virtuel d'une simulation numérique non visqueuse, il se trouve que le flux résultant, de part et d'autre de la planche, sera symétrique. Cela signifie que toutes les forces de portance et traînée s'annuleront mutuellement (fig. 3.5). Si la viscosité et la couche limite, qui en découle, n'existaient pas, il n'y aurait ni traînée ni portance sur les voiles et les ailes. La figure 3.6 montre que le flux d'air est capable de contourner l'angle et même de remonter à contre-courant. Mais, comme Prandtl l'a constaté, la viscosité est bien réelle. Revenons à notre exemple. Le flux d'air commence à adhérer au profil permettant à la couche limite de se former, un phénomène d'abord mis en évidence par l'aérodynamicien hongrois Henri Coanda, et qui a pris le nom « d'effet Coanda ». Une couche limite réagit mieux à l'accélération qu'à la décélération. Elle n'aime pas les virages serrés. Si elle y est contrainte, alors la séparation se produit. En présence de viscosité, l'écoulement est incapable de faire un tour complet du bord de fuite. Il tente de le faire pour revenir dans l'écoulement libre, mais il finit par quitter le profil prématurément, créant ainsi un tourbillon. On parle de *tourbillon initiateur*. Celui-ci est emmené en aval avec le flux (fig. 3.7). En pratique, cela se produit chaque fois que l'on borde les voiles après un départ ou un virement.

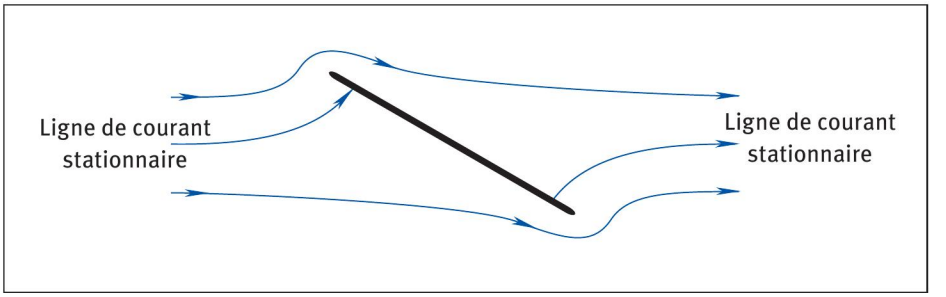


Figure 3.5 Flux d'air symétrique sans viscosité.

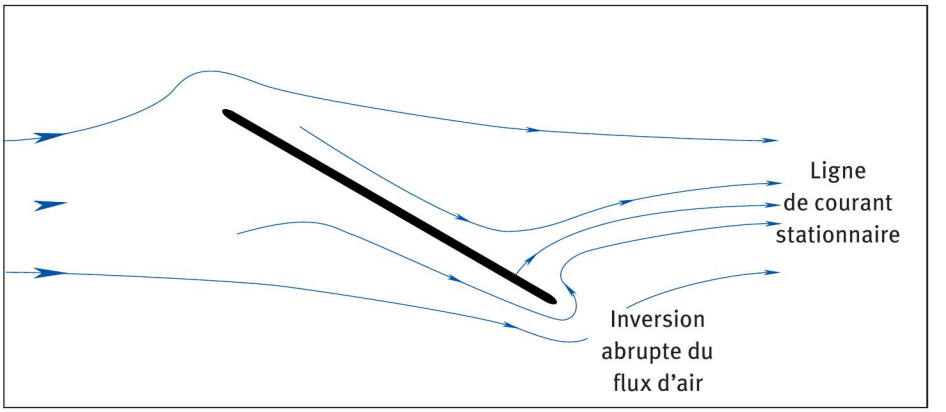


Figure 3.6 Inversion du flux d'air sans viscosité.

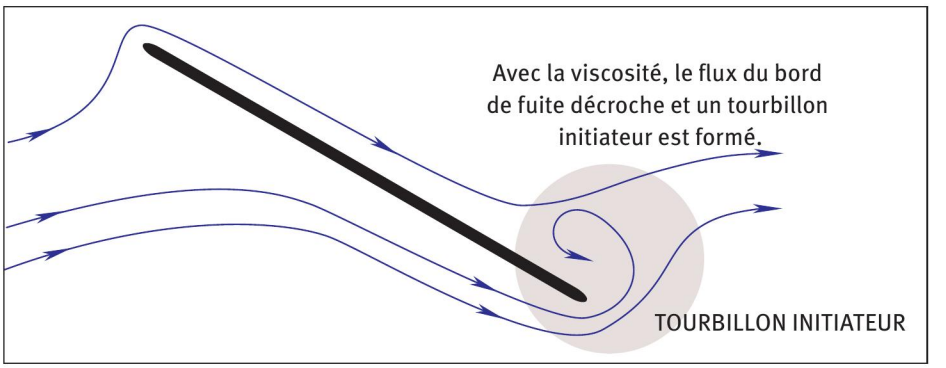


Figure 3.7 Flux d'air avec viscosité.

Comme l'écoulement sous le vent de notre « voile-plaque » (la ligne de courant supérieure sur la figure 3.7) est incapable de combler le vide, le fluide doit venir d'ailleurs. La nature ne tolère pas le vide, même partiel. Ainsi, le flux qui serait passé au vent (la ligne de courant médiane) est en fait détourné vers le haut pour combler le vide. Les lignes de courant illustrent ce phénomène : l'air dévié depuis le bas (au vent) circule sur la chute vers le haut (sous le vent). Même si ces figures ne le précisent pas, les lignes de courant peuvent indiquer la vitesse. Par définition, la vitesse et la direction entre les lignes de courant resteront toujours les mêmes.

Les lignes de courant d'écoulement stationnaire sont particulièrement importantes pour notre compréhension. Un profil d'aile comporte deux lignes de courant stationnaire : l'une sur le ou à proximité du bord d'attaque, et l'autre au niveau ou près du bord de fuite (fig. 3.8). Dans le cas d'un profil aérodynamique, la ligne de courant stationnaire sépare le flux d'air qui circule le long de l'extrados (sous le vent) de celui qui s'écoule sur l'intrados (au vent). Sur la figure 3.8, tout l'air à gauche de la ligne de courant stationnaire – plutôt que de se déplacer sur le côté inférieur – est dévié vers le haut. À noter également le décalage vers l'arrière de la ligne de courant stationnaire du bord d'attaque, provoqué par l'effet de la « circulation », que l'on abordera ci-dessous. Comparez les figures 3.5 à 3.8, et notez

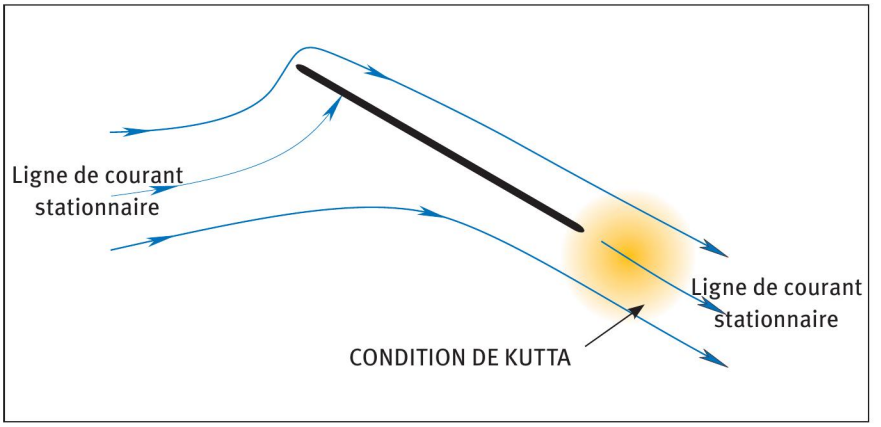


Figure 3.8 Ligne de courant stationnaire et condition de Kutta.

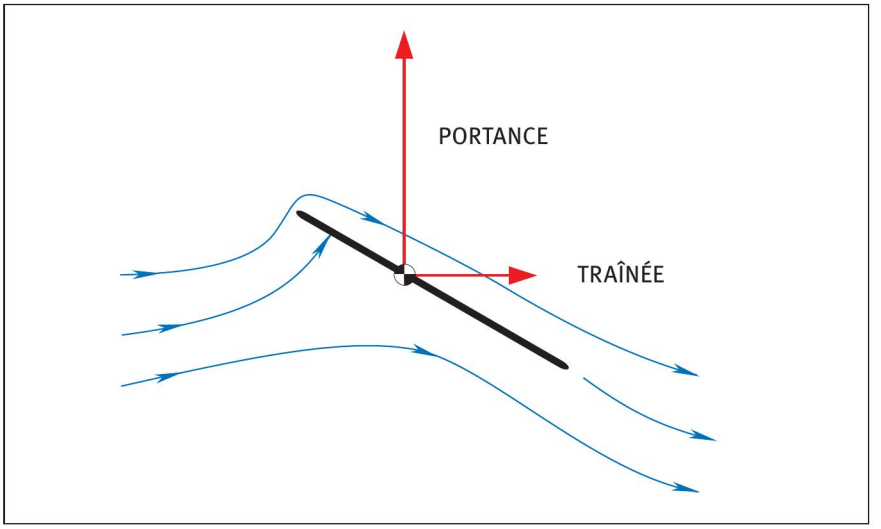


Figure 3.9 La portance et la traînée sont les résultantes de l'écoulement en mouvement.

comme la ligne de courant stationnaire avant s'est déplacée vers l'arrière dans le dernier schéma. En fait, l'ensemble de l'écoulement autour du profil s'adapte de telle sorte qu'il y ait beaucoup plus d'air qui passe sur la face supérieure (ou côté sous le vent) du profil. Cela vaut la peine de s'attarder sur un autre comportement de l'écoulement visqueux. Sur la figure 3.8, le flux d'air s'adapte rapidement de sorte que les flux émanant de l'intrados et de l'extrados s'écoulent du bord de fuite de manière homogène. Les lignes de courant sont à nouveau parallèles les unes aux autres et à égale distance du profil. Cette configuration des lignes de courant met en évidence les flux de part et d'autre à distance du profil qui se déplacent à la même vitesse. Dans le jargon aérodynamique, ce phénomène de bord de fuite est appelé condition de Kutta, nommée d'après l'un des scientifiques de notre illustre groupe, Martin Wilhelm Kutta qui en a fait la découverte en 1902.

Si la condition de Kutta n'existait pas – c'est-à-dire si les pressions sur les deux côtés du profil étaient inégales au niveau du bord de fuite –, les zones de haute et basse pressions se mélangeraient dès lors qu'elles ne seraient plus séparées par le profil. Aujourd'hui, lorsque les aérodynamiciens simulent l'écoulement autour d'un profil, ils se simplifient la tâche en appliquant la condition de Kutta à leur modèle.

Pour avoir observé les penons de chute, nous, les marins, savons que la condition de Kutta n'est pas toujours satisfaite, même si elle est techniquement exacte. La pratique ne contredit pas la condition de Kutta dès lors que les pressions sont égalisées à proximité de la chute de la voile. En outre, dans certains cas réels, la condition de Kutta est satisfaite, notamment sur plans d'eau calmes avec un réglage parfait des voiles et un vent médium régulier. Dommage que nous, les marins, ne puissions pas simplement imposer la condition de Kutta sur nos voiles comme le font les aérodynamiciens de temps à autre !

Sur la figure 3.9, on peut observer qu'il y a davantage d'air provenant du dessous dévié vers la face supérieure, rendant le débit asymétrique. L'écoulement qui s'échappe de notre plaque a été dévié dans une direction quasiment parallèle à celle-ci. Cela nous amène au cœur du sujet. Dans le cas d'un écoulement visqueux, une force de poussée, dont la composante est toujours perpendiculaire à l'écoulement en amont du profil, résulte de la somme des forces de pression autour du profil (fig. 3.9). Cette force est communément appelée portance. L'action de friction ou de frottement des couches limites provoque également une force de traînée dans la direction du flux en amont du profil. Mais nous n'avons pas encore expliqué pourquoi la portance est nettement supérieure à la traînée quel que soit le type de profil : la plaque plane, l'aile de l'avion à section cambrée ou la voile courbe. Pour cela, nous devons au moins mentionner Nikolai Zhukovsky (parfois romanisé en Joukowski). Avec l'aide de Kutta, Zhukovsky mit en évidence un autre phénomène engendré par le déplacement d'un fluide autour d'une forme avec un certain angle d'attaque. C'est devenu le théorème de Kutta-Joukowski. Le premier était originaire d'Allemagne, le deuxième de Russie. En résumé, leur « théorie de la circulation » était une réponse mathématique à la question « pourquoi ? » posée en début de chapitre. Nous allons maintenant tenter de comprendre ce principe.

Le tourbillon initiateur

Précédemment, nous avons identifié le tourbillon initiateur (fig. 3.10). Pour faire une analogie mécanique, c'est une roue ou un pignon qui entraîne une roue plus grande : le flux de circulation (fig. 3.11). Le tourbillon initiateur est dispersé en aval une fois la circulation établie, un phénomène qui se produit à chaque virement ou chaque fois qu'un nouveau flux est établi sur les voiles. Pour ce faire, il faut que la ligne de courant stationnaire arrière se décale à proximité du bord de fuite pour satisfaire la condition de Kutta. Pourquoi ? Car une fois la condition de Kutta imposée, la différence de vitesse de part et d'autre du profil est nulle ; il n'y a pas de stimulation physique pour maintenir ou alimenter le tourbillon initiateur. Par conséquent, l'écoulement autour d'un profil se compose de deux flux distincts réunis. L'un est appelé l'écoulement de non-circulation. Le second est l'écoulement de circulation. Pour l'occasion, nous venons d'apprendre comment assurer un écoulement homogène du bord de fuite. La figure 3.12 montre que sur la partie supérieure (côté au vent) du profil aérodynamique, l'écoulement de circulation est dans le même sens que l'écoulement de non-circulation. Les deux flux s'additionnent, ce qui augmente la vitesse d'écoulement et diminue la pression. Sur la face inférieure, cependant, le sens de circulation va à l'encontre du flux de non-circulation, de sorte que les deux flux s'opposent, ce qui ralentit l'écoulement et augmente la pression. Sur la face supérieure (sous le vent), cette action complémentaire engendre une vitesse plus élevée et une faible pression. Sur le côté inférieur (au vent), cette action opposée réduit la vitesse et augmente la pression. L'augmentation de ce delta de pression dû à la circulation génère plus de portance, sans augmenter la traînée.

Grâce aux efforts conjugués des deux flux, les avions peuvent voler, et ce, même à l'envers. Une aile à l'envers ne constitue pas une forme optimale, mais elle fonctionnera, au moins pour un temps. De la même façon, la combinaison du flux de circulation et l'écoulement de non-circulation permet au voilier de naviguer au près.

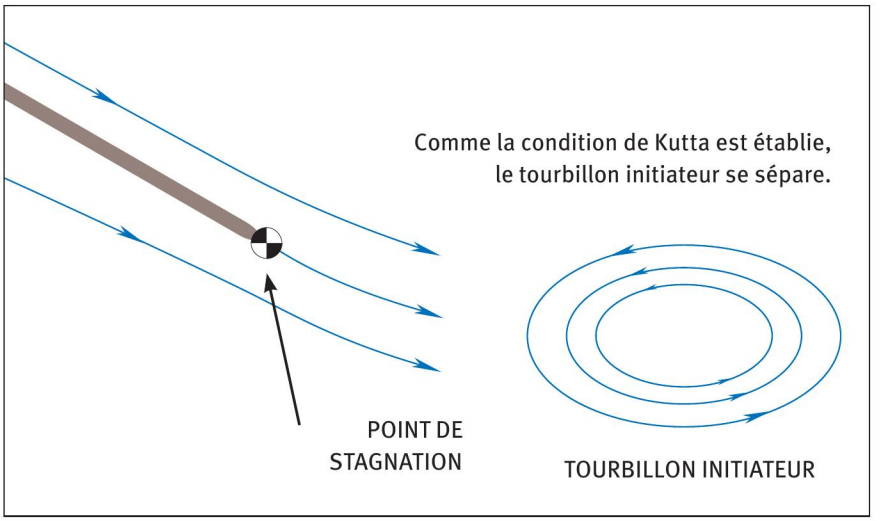


Figure 3.10 Formation du tourbillon initiateur.

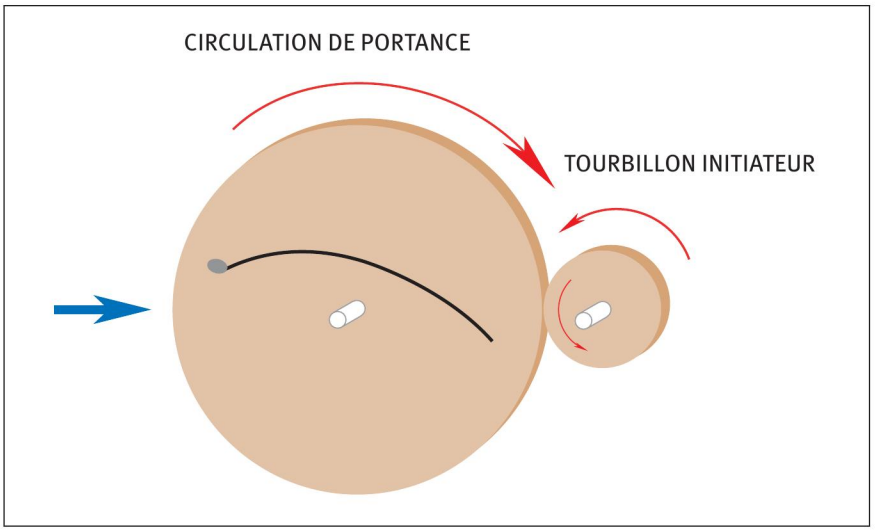


Figure 3.11 Le tourbillon de départ entraîne la grande roue de circulation.

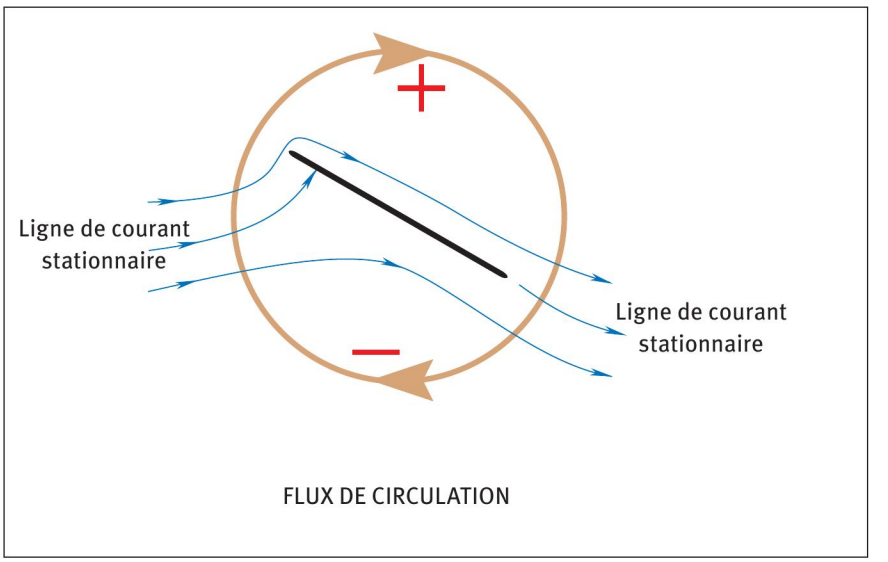


Figure 3.12 Flux de circulation autour d'une plaque.

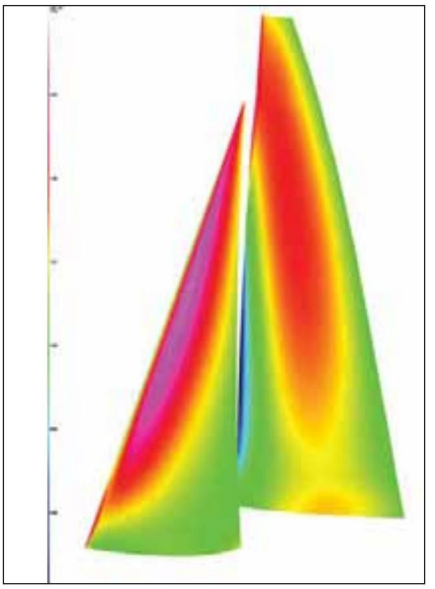


Figure 3.13 Un graphique numérique des voiles d'un TP52 bordées au près dans 11 nœuds de TWS sous le vent. Notez l'échelle à gauche. Le haut de l'échelle (blanc) indique 1,75, ce qui signifie que la vitesse locale prédite est de 1,75 x l'écoulement libre. Le bas de l'échelle est de 0,5, ce qui signifie que les zones bleu sombre montrent une vitesse locale de 0,5 x l'écoulement.

Quantifier la théorie

Afin de prouver et quantifier les effets positifs de la circulation, en particulier dans le cas de deux voiles qui interagissent, nous nous tournons vers Michael Richelsen, directeur technique de North, pour un galop d'essai sur son TP52. À vrai dire, son bateau n'était pas un bateau, mais un modèle de TP52 sur son ordinateur. L'objectif était de calculer les pressions via un processus itératif de couplage aéro-élastique d'analyse par éléments finis (FEA) et de mécanique des fluides (CFD), nous permettant ainsi de visualiser les phénomènes sur les voiles (chapitre 6.) Notre défi était de quantifier les éléments suivants :

A. la valeur de la vitesse d'écoulement local sur les deux faces au vent et sous le vent de la grand-voile et du foc par rapport à l'écoulement libre ;
B. le delta de vitesse entre le côté au vent et celui sous le vent du foc et de la grand-voile ;
C. la réduction de la vitesse dans la fente : couloir résultant de la présence de la voile d'avant en amont de la grand-voile ;
D. le bénéfice net sur la portance totale (c'est-à-dire la force de propulsion) de la circulation qui résulte de la combinaison grand-voile/foc, en comparaison avec la somme des parties.

Michael avait de bonnes raisons d'être réticent. Alors que certaines comparaisons comme A, B, et dans une moindre mesure C, fournissaient des chiffres raisonnables ou crédibles, le point D se heurtait à toutes sortes de problèmes de comparaison. Voici le résultat de nos recherches. Pour créer une force de portance, nous savons que nous devons obtenir un écoulement d'air plus rapide sur le côté sous le vent qu'au vent. Mais plus rapide de combien ?

La figure 3.13 est une représentation graphique des deltas de vitesse entre le côté au vent de l'écoulement relatif à l'écoulement libre sur un TP52 sous Medium # 1 (foc Code 2) et une grand-voile au près avec des réglages de régate dans 11 nœuds TWS. Puisque la vitesse du bateau dans ces conditions est de 8,4 nœuds, nous supposerons une vitesse d'écoulement (AWS) de 19,4 nœuds.

Les cambrures les plus fortes se trouvent dans le tiers avant du foc. Celles-ci provoquent les accélérations d'écoulement les plus fortes, et c'est donc là qu'on observe le plus grand delta de vitesse relativement à l'écoulement libre, comme en témoigne la couleur pourpre sur la figure 3.13. La majorité de la portance est créée dans cette zone.

L'échelle à gauche sur le graphique indique le rapport de la vitesse d'écoulement local à l'écoulement libre. La zone de couleur violette sur le tiers avant représente un débit d'environ 1,6 fois l'écoulement libre, soit environ 31 AWS. Toutefois, le temps qu'il atteigne la chute, l'écoulement sur la face sous le vent a retrouvé la vitesse de l'écoulement libre, du moins sur l'ordinateur. Dans la même zone sur la face au vent de la voile d'avant, on observe un débit égal à la moitié de celui de l'écoulement libre, soit 10 AWS.

La grand-voile connait un pic de vitesse sous le vent d'environ 1,35 fois celle de l'écoulement libre, soit 26 AWS. En comparaison, le pic de vitesse au vent dans la même zone est d'environ 0,6 fois celle de l'écoulement libre, soit 12 AWS. Les pics de deltas de vitesse entre le côté sous le vent et celui au vent pour le foc ont donc un rapport d'environ 3,1. À n'en pas douter, cette donnée surprendra de nombreux lecteurs. Pour la grand-voile, ce même pic de delta est d'environ 2,2, bien inférieur à celui du foc. Il faut garder à l'esprit que la surface du foc est beaucoup plus petite. Néanmoins, à surface identique, le foc contribue bien plus à la force totale de propulsion au près que la grand-voile.

Maintenant, on s'aperçoit combien il est difficile de réunir la condition de Kutta : au niveau de la chute, les écoulements au vent et sous le vent doivent avoir une vitesse égale et donc une pression égale. Dans cette analyse de code à panneaux où l'on impose la condition de Kutta, le dégradé de couleurs ne permet pas de le vérifier. Pourtant, c'est bien le cas. En pratique, dans certaines situations, on vérifie la condition de Kutta exactement au niveau de la chute, mais le plus souvent légèrement en aval. En ce qui concerne l'effet de fente lié à l'interaction foc/grand-voile, référez-vous à la figure 3.13.

Notez les zones bleu foncé, bleu clair et verte juste derrière le guindant de la grand-voile, en particulier dans la moitié inférieure où la circulation du foc a le plus d'impact sur la

grand-voile (le mât n'est pas modélisé dans cette étude). Ceci reflète un débit de 65 pour cent de l'écoulement libre, soit environ 13 AWS dans cette zone.

Comparons ces données sur la face sous le vent de la grand-voile en l'absence de foc dans la figure 3.14, mais avec le chariot choqué pour simuler des conditions réelles et éviter la séparation au bord d'attaque qui peut être préjudiciable (sans le foc, la déflexion du flux sur la grand-voile est moins importante). Ici, nous notons une mince bande blanche, puis rouge, signifiant un flux beaucoup plus élevé : 1,6 fois supérieur à l'écoulement libre, soit environ 31 TWS (vitesse vent réel). En résumé, *la différence de vitesse dans la fente avec et sans l'effet de la circulation du foc est environ de 18 nœuds AWS* (vitesse de vent apparent). Encore une fois, ces résultats peuvent vous surprendre. La figure 3.15 illustre des vitesses plus faibles sur le côté au vent de la voile.

Soulignons un point intéressant à propos de l'effet positif du foc sur la grand-voile. La réduction significative de l'écoulement à travers la fente dû à la présence du foc est évidente, sans quoi, l'augmentation significative de la vitesse de l'écoulement sur la face sous le vent de la grand-voile serait un scénario classique de séparation et de décrochage. Ainsi, alors que la présence du foc contraint à border davantage la grand-voile, la déflexion du flux en aval du foc crée un gradient de pression beaucoup plus doux sur la partie avant de la grand-voile ; ce qui permet à la grand-voile de fonctionner efficacement bordée.

Le principe de la circulation est que son effet sur la somme des parties est supérieure à celui des parties, autrement dit 1 + 1 => 2. Mais dans quelle mesure ? Et est-ce que cette équation se vérifie à travers la plage de vent ? Il est difficile de répondre avec certitude à cette question en s'appuyant sur le modèle virtuel de TP 52 de Richelsen. Il existe de nombreuses actions et réactions interdépendantes venant de la combinaison foc/grand-voile, par rapport aux deux voiles agissant séparément. En outre, l'ensemble des deux voiles se comporte comme une seule grande voile. C'est peu différent d'une aile à fente en carbone. Par conséquent, le bord d'attaque de notre ensemble se résume à celui du foc jusqu'au capelage, puis à celui de la grand-voile dans le cas d'un gréement fractionné. Comparer la somme du foc et de la grand-voile séparément (en additionnant les forces) aux deux voiles ensemble n'aurait aucun sens. Pourquoi ? Principalement en raison de la différence significative de l'effet du bord d'attaque. Rappelons que plus le bord d'attaque est long, plus l'écoulement libre est dévié.

De ce fait, nous ne pouvons que spéculer sur l'exacte contribution de l'effet positif de la circulation de la grand-voile sur le foc et vice versa. Notre analyse, aussi approximative soit-elle, suggère que l'effet positif pourrait être de l'ordre de 15-20 pour cent. Cependant, ce n'est pas vrai dans toutes les conditions de vent. Voici pourquoi. Rappelons les deux modes de navigation pour un bateau de course moderne : l'un sous-toilé, l'autre bien toilé avec tout l'équipage au rappel. Le premier cas de figure, avec un vent réel de 6 à 10 nœuds (TWS), requiert des réglages de voiles très différents de celui dans 11 à 18 nœuds de vent. Dans ces conditions de vent léger, on peut largement faire évoluer le Cl le long de sa courbe avant d'atteindre le Cl max. Autrement dit, on cherche à créer la plus grande portance possible afin de générer une plus grande force propulsive, un sujet que nous allons traiter en détail dans le chapitre suivant. À condition de ne pas être trop proche du Cl max., plus le Cl est élevé, mieux c'est. Dans le cas du voilier bien toilé, on évolue à des Cl proches ou au pic de la courbe de Cl, voire au-dessus. Nous ne cherchons pas plus de portance, voire pas du tout en haut de range. En fait, souvent, nous essayons de réduire la portance en aplatissant les voiles pour contrôler la force de gîte.

En résumé, l'objectif consiste à optimiser la force de propulsion pour un moment de gîte donné. Cet exercice est somme toute différent de celui d'une aile d'avion où on cherche à optimiser le rapport L/D en ignorant les contraintes structurelles. La section d'une aile d'avion est conçue pour fonctionner à proximité du pic de la courbe L/D quand il vole à sa vitesse de croisière. En revanche, pour un voilier, on se focalise plutôt sur le ratio de la force de propulsion sur le moment de gîte, sans compter qu'en voile il n'existe pas de « vitesse de croisière ». Rappelons qu'une circulation dans le sens horaire augmente les vitesses du flux sous le vent des deux voiles et les réduit au vent. Car ce sont les circulations combinées de l'ensemble foc et grand-voile bien réglé qui déplacent le Cl

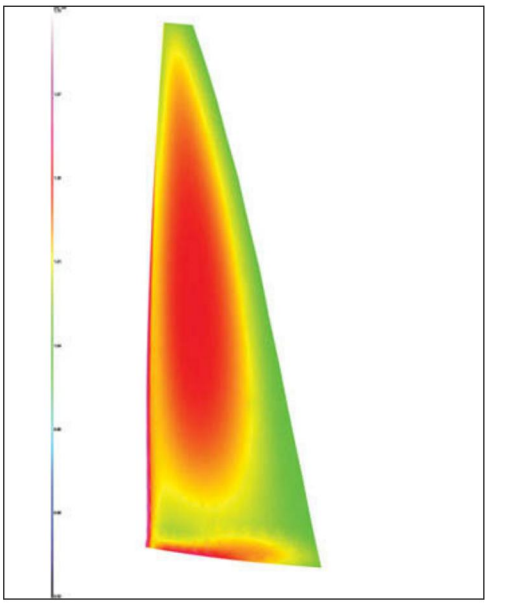


Figure 3.14 Vitesses locales calculées le long du côté sous le vent de la grand-voile sans le foc. Notez les zones à haute vitesse (violet / rouge) dans la partie inférieure du guindant, qui n'apparaissent pas dans la figure 3.13 en raison de l'effet de fente.

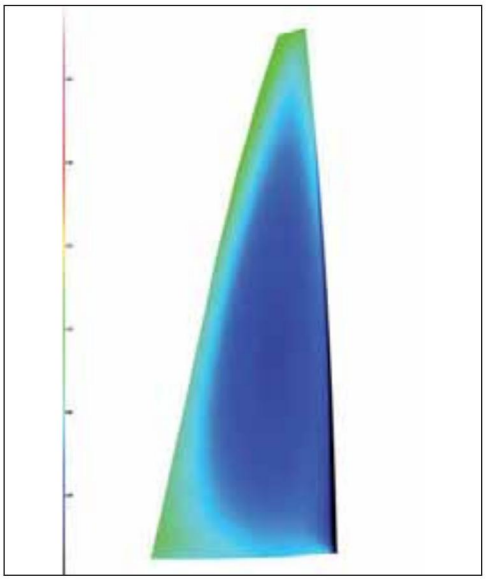


Figure 3.15 Vitesses locales calculées du côté au vent de notre TP 52. À noter que globalement les vitesses sont nettement inférieures à celles du côté sous le vent.

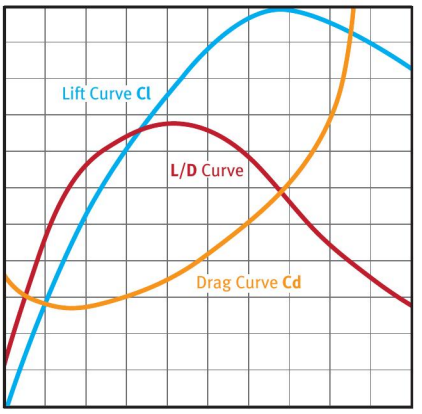


Figure 3.16 La ligne rouge représente le rapport portance/traînée (L/D), qui est la combinaison de la courbe bleue du coefficient de portance (Cl) et de la courbe jaune du coefficient de traînée (Cd). Notez comment, dans cet exemple générique, le rapport L/D atteint son maximum alors que le coefficient de portance Cl continue à s'accroître. En effet, la traînée augmente plus rapidement.

le plus rapidement le long de sa courbe au près ; il paraît cohérent que cet effet positif s'avère moins utile dans les hauts de range. Pour être plus précis, la combinaison des deux voiles avec une fente permet un pic de Cl plus élevé pour une séparation de bord de fuite donnée. Ce qui signifie que nous pouvons générer plus de portance sans que le coefficient de traînée (Cd) ne nuise à l'effet positif de l'augmentation de la portance. En effet, la combinaison positive de circulations permet un gradient de pression plus uniforme, créant une condition de Kutta près de la chute de la grand-voile. Par ailleurs, cela est également vrai pour une aile à fente, comme vous pouvez le voir sur la photo des catamarans de la Coupe de l'America précédemment dans ce chapitre.

Par conséquent, au lieu de comparer deux voiles utilisées ensemble avec deux séparément, peut-être qu'il est plus judicieux de considérer la combinaison des deux voiles sur notre TP 52 par rapport à un catboat de surface et CE équivalents, de manière à obtenir le même équilibre, et donc le même angle de barre dans des conditions de vent identiques. Si l'on fait appel à notre compréhension et si on se base sur notre discussion précédente, il semble cohérent que la combinaison des deux voiles l'emportera toujours tant que l'objectif sera une force propulsive maximale pour une force de gîte donnée. Cependant, dans des conditions plus musclées (disons 15 à 20 TWS), on pourrait imaginer que le gréement de catboat serait aussi efficace voire meilleur.

Alors, tout cela suffit-il à prouver l'existence de la circulation ? Certains resteront dubitatifs, d'autres quelque peu déconcertés. Il est difficile d'appréhender totalement comment ces phénomènes interagissent. Néanmoins, comme nous l'avons expliqué dans l'édition précédente de ce livre, nous en avons la démonstration dans une baignoire, dans un programme informatique ou dans le monde réel : un Airbus 380 qui décolle ou le trimaran à foil de *Vestas Sailrocket 2,* mené par l'Australien Paul Larsen et qui a établi un record de vitesse à la voile avec 65,45 nœuds en novembre 2012, sur 500 mètres dans la baie Walvis, en Namibie.

Pour qu'un avion vole ou un voilier navigue, au moins cinq phénomènes doivent se produire autour du profil aérodynamique. Certains ou tous seront évoqués dans les chapitres suivants, et nous les récapitulons ici :

- changement de direction du vent (profil) ;
- viscosité – formation de la couche limite ;
- tourbillon initiateur ;
- circulation ;
- condition de Kutta.

Vestas Sailrocket 2 (photo ci-dessus) détient le record du monde de vitesse à la voile (sur l'eau) avec une vitesse de 65,45 nœuds (121 km/h) sur 500 mètres, soit 3 fois la vitesse du vent. En 2013, *Emirates Team New Zealand* établissait un record de vitesse à la voile de 47,6 nœuds (88 km/h) dans un vent de 21,8 nœuds lors de la Coupe de l'America à San Francisco. C'est 2,2 fois la vitesse du vent.
Paul Larsen, le skipper de *Sailrocket 2*, avait réussi à atteindre ce record grâce à une combinaison de trois facteurs : une friction hydrodynamique minimale des foils, une friction aérodynamique minimale de la coque capable de pivoter de 20 degrés dans l'axe du vent apparent et une portance maximale générée par l'aile en carbone inclinée sous le vent afin de réduire la force de gîte. À ces vitesses rapides, le plus grand défi est que l'eau se transforme en gaz (vapeur) autour des appendices (cavitation). De plus, le phénomène de ventilation (aspiration de l'air dans l'eau autour du safran ou du foil) s'avère plus complexe au-delà de 50 nœuds qu'à des vitesses normales de navigation pour les bateaux classiques ou les catamarans de la Coupe. En conséquence, la modélisation de *Sailrocket* a été difficile à réaliser et a conduit à de nombreux essais et tâtonnements. (Photo Helena Darvelid/Vestas Sailrocket.)

VOLVO
OCEAN
RACE
Alvimedica
Alvimedica
volvooceanrace.com
Alvimedica
Alvimedica

L'aérodynamique : de la théorie à la pratique

La photo ci-contre montre un bateau Volvo Ocean Race 2014-2015 naviguant au bon plein avec quatre voiles. L'intérêt de cette configuration n'est pas tant d'avoir une surface de voile plus grande pour remonter le long de la courbe du coefficient de portance (Cl), mais plutôt de créer une autre fente (espace entre deux voiles), trois au total, pour permettre d'augmenter la portance maximale. Toutefois, ce cas de figure ne s'applique qu'aux allures de bon plein et non de près. Rappelons que le foc et la trinquette derrière le génois en tête ont un angle de vent apparent plus serré, comme une grand-voile avec une voile d'avant. Et parce que ces deux voiles d'avant doivent être plus rentrées, cela oblige à remonter le chariot de grand-voile encore plus haut que si on avait une seule voile d'avant. À un moment donné, la force de gîte augmente au point de nuire à la VMC (*Velocity Made on Course* ou vitesse sur le cap, c'est-à-dire vitesse de progression sur la route) pour toutes les raisons détaillées au chapitre 3.

De toute évidence, il y a un point de fonctionnement idéal pour cette configuration de voile, ce qui rend la Volvo Ocean Race, course monotype, si intéressante au regard du jeu de voiles. Ce raisonnement n'est pas si différent de celui d'un concepteur d'aile rigide de la Coupe. On sait pertinemment qu'une aile rigide sera plus performante qu'une voile souple. Pourtant les ailes rigides n'ont pas toujours de fente. Mais pour quelles raisons, alors, les ailes rigides de la Coupe de l'America en sont-elles munies ? En fait, il existe un facteur supplémentaire pour un catamaran AC : la force maximale de gîte est atteinte très rapidement, mais elle se stabilise dans une plage de vitesse de vent étendue. Sur un catamaran, on peut considérer que la force de gîte est presque constante dès lors que la coque au vent se soulève hors de l'eau. Dans cette situation, ce sont les foils qui permettent de réduire la friction importante de la coque sous le vent. Le vol est atteint plus facilement en déplaçant rapidement le Cl vers le haut le long de sa courbe, et en ayant un Cl max. plus élevé (c'est la raison pour laquelle, en théorie, deux fentes – trois éléments verticaux – seraient plus rapides dans certaines conditions). Puis, lorsque la pression augmente de telle sorte que la force de gîte atteigne une limite acceptable, la partie supérieure de l'aile peut s'inverser, abaissant ainsi le centre d'effort (CE), et améliorant le précieux rapport moment de gîte/force de propulsion.

Un effet similaire est recherché, mais reste moins efficace sur les voiles souples, et en particulier les grands-voiles, lorsqu'on vrille excessivement le haut de la chute. La difficulté est que les voiles qui battent sont très lentes en raison d'une traînée rédhibitoire. Voilà pourquoi il faut se résoudre à prendre un ris, même si c'est difficile et contraignant. Pourtant, l'objectif reste le même : abaisser le CE pour diminuer la force de gîte. Avec une aile rigide, l'inversion de cambrure en tête et la rotation excessive créent effectivement un moment de redressement sur les sections supérieures, favorisant des cambrures encore plus marquées dans le bas de l'aile et donc une puissance plus importante pour une vitesse de vent donnée.

L'aile rigide est plus performante qu'une voile souple à plus d'un égard. Nous en avons évoqué les raisons les plus subtiles au début de ce chapitre. Étant donné que la structure nervurée de carbone ne bat pas, l'aile aura une plage plus large de Cl que celle d'une voile souple afin de maintenir les deux coques en vol plus longtemps. Et comme l'aile génère de la portance tout au long du virement, à l'exception de 1 ou 2 degrés directement dans l'axe du vent, un voilier à aile rigide va virer beaucoup plus rapidement. La « prise de ris » (en inversant la partie supérieure de l'aile) est presque instantanée et beaucoup plus efficace.

Ci-contre, ***Alvimedica***, un VOR 65 de l'édition 2014-2015, navigue au bon plein avec quatre voiles. Cette configuration inhabituelle, même pour ces bateaux de la Volvo, peut être très efficace, mais uniquement dans certaines conditions de vent précises. Même avec un angle de vent apparent identique, un vent plus faible ne pourrait surmonter tous ces changements de direction nécessaires pour contourner ces quatre voiles. Et, étant donné que dans ce cas de figure, ***Alvimedica*** se situe à proximité immédiate du sommet de sa courbe de coefficient de portance (Cl), une vitesse de vent plus élevée compromettrait l'équilibre du bateau en accentuant la gîte et en augmentant trop rapidement la traînée. (Photo Juerg Kaufmann/Team Alvimedica.)

Oracle, vainqueur de la 34e Coupe de l'America. La partie inférieure de l'aile de cet AC72 effleure le pont : on parle d'effet de plaque dont l'objectif est de réduire la traînée induite sous l'aile. Remarquez également la cambrure au bas de l'aile qui est d'environ 30 degrés, bien plus qu'une voile souple. Le devers à mi-chute est quasi inexistant avec une aile. Quant à la partie supérieure de l'aile, on observe une inversion de la cambrure dont l'augmentation de traînée par rapport à une cambrure plate est plus que compensée par le gain en moment de rappel. Mais qu'en est-il de la fente ? Nous y répondrons dans les paragraphes suivants. (Photo Daniel Forster.)

Principes des éléments à fentes

Observez la photo ci-dessus qui représente *Oracle* lors de la 34e Coupe de l'America à San Francisco. Notez la fente entre la partie avant de l'aile (appelée Élément 1) et sa partie arrière (Élément 2). Il en découle une question : pourquoi les concepteurs découperaient un trou dans une section parfaite de l'aile ? Serait-ce pour égaliser la pression de l'air de part et d'autre de l'aile, réduisant ainsi la portance totale disponible ? Oui, cela permet d'avoir une aile plus creuse, et donc un gain de portance. Mais est-ce que cette fente compromet le rapport L/D ? Avant de répondre à cette question, nous allons examiner les similitudes et les différences entre les voiles souples et les ailes rigides.

Les catamarans de la Coupe de l'America de 2013 et 2017 présentent deux avantages significatifs sur des monocoques de taille similaire. Le premier est une traînée de frottement dans l'eau fortement atténuée puisque seuls les hydrofoils sont en contact – en supposant un vent suffisant pour voler au près. Le deuxième est qu'une aile rigide peut être nettement plus efficace qu'une voile souple à surface égale. Le devers de la chute à mi-hauteur en est la raison principale. C'est la hantise de tout régleur de voiles comme nous le verrons dans le chapitre sur la grand-voile. Mais, pour les ailes rigides en carbone, le problème ne se pose pas. En effet, le régleur d'aile bénéficie d'un bien meilleur contrôle sur la forme de l'aile que dans le cas des voiles souples, et donc d'une meilleure maîtrise sur sa capacité d'augmenter la force propulsive. L'exemple suivant met en évidence ce point. Comme nous l'avons indiqué plus haut, les catamarans AC, à la différence des monocoques, ont une stabilité illimitée jusqu'à un certain point. Cela signifie qu'il est toujours avantageux d'augmenter la force de propulsion, même au détriment de la traînée. À cette fin, le régleur d'aile optera pour deux réglages qu'un régleur de voiles classiques ne peut faire. Premièrement, il règlera la cambrure de la section inférieure de l'aile à environ 30 degrés, bien plus que ce qu'une cambrure de voile souple pourrait atteindre. Il en résultera une très grande portance à condition que l'angle d'attaque ne

soit pas trop serré. Certes, comme on a vu plus haut, on aura potentiellement plus de traînée. Pourtant, c'est là qu'intervient un autre avantage notable de l'aile sur une voile traditionnelle. En raison de l'effet de plaque – l'aile se situant tout près du pont –, le tourbillon marginal est fortement réduit sous l'aile. Rappel du chapitre 3 : le tourbillon marginal constitue le facteur dominant parmi les deux responsables de la traînée induite. Par conséquent, cette cambrure accrue sur la partie inférieure de l'aile est bien moins pénalisante en termes de traînée induite qu'une cambrure similaire sur une voile souple.

Le deuxième réglage s'éloigne largement des possibilités de contrôle des voiles classiques. Il s'agit de l'inversion de la partie haute de l'aile qui lui confère une cambrure négative. Une cambrure négative sur cette surface supérieure, juste au-dessus d'une section à cambrure positive, impose un changement net dans la distribution verticale du Cl. Comme nous le savons maintenant, des différences si marquées de Cl contribuent à une part importante de la traînée induite et constituent donc un frein. Si l'inversion de la section supérieure a toute sa raison d'être, c'est dans le but d'abaisser le CE du plan de voilure. Par cette action, on crée une plus grande force de propulsion soit en bordant davantage, soit en remontant le chariot pour augmenter l'angle d'attaque malgré une traînée plus élevée. En substance, en se référant à la figure 3.16 du chapitre précédent, l'aile crée un pic beaucoup plus haut du Cl, avec seulement une petite hausse du pic de traînée. Même si la traînée est augmentée à travers l'inversion, les autres facteurs qui contribuent à la diminuer compensent largement. La clé est de ne pas pousser le catamaran à la limite de son moment de redressement très élevé. Ainsi, les concepteurs d'ailes visent à créer une portance maximale, ce qui nous amène à notre énigme.

Pourquoi introduire au tiers de la section une fente alors que celle-ci réduit le différentiel de pression (et donc une portance potentielle) ? Pour y répondre, observez l'écoulement qui contourne une aile sans fente. Comme on le voit sur la photo, il n'y a aucun foc (ou alors un tout petit) pour réduire l'écoulement dans la fente. Alors, cet écoulement forme une bulle de séparation sur le bord d'attaque arrondi de l'aile sous le vent. En raison du carénage lisse de cette dernière, la bulle sera moins problématique par rapport à une grand-voile et son mât. Ensuite, l'écoulement accélère au fur et à mesure qu'il se rattache à la surface de l'aile sous le vent pour former une couche limite. Comme la courbure de l'aile diminue et la couche limite se déplace vers l'arrière, nous savons d'après le chapitre précédent que l'écoulement commence à ralentir, devenant ainsi plus instable. Rappelons que ce phénomène se produit indépendamment du fait que la couche limite soit laminaire ou turbulente. Plus le flux ralentit, plus les chances de séparation de cette couche limite augmentent. L'écoulement laminaire, plus probable avec une aile qu'avec une voile, se sépare plus facilement que l'écoulement turbulent. Dans l'éventualité que la condition de Kutta ne soit pas atteinte à proximité du bord de fuite, les sections arrière, lisses et droites de l'aile permettent à l'écoulement sous le vent de ralentir de façon uniforme, tandis que le côté au vent ne ralentit pas autant. Une partie de la réponse de la nécessité d'une fente est donnée ci-dessus. Avoir une charnière verticale permet d'accentuer la cambrure là où c'est particulièrement nécessaire : aux allures portantes. Cependant, les nombreux aérodynamiciens (y compris les dessinateurs de voiles), qui ont étudié les ailes pour la Coupe de l'America, sont convaincus que la fente accomplit exactement ce que suggère la discussion théorique ci-dessus. Elle accélère l'écoulement sur l'extrados de l'élément arrière. Une situation semblable à la configuration d'une grand-voile précédée d'un foc classique à la limite du recouvrement (LP de 100 %) où la grand-voile est de loin l'élément le plus long. Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, la voile souple a besoin de sections arrière plus rondes pour générer une portance suffisante. Il en résulte un plus grand delta de pression au bord de fuite de la voile par rapport à celle de l'aile. Réciproquement, l'aile génère une bulle de séparation plus petite au niveau de la chute et satisfait la condition de Kutta plus rapidement, comparée à une voile souple. Les ailes rigides pour voiliers existent au moins depuis 1971. C'est grâce à l'intérêt grandissant dans la Coupe de l'America qu'elles ont commencé à se multiplier. Vous n'en trouverez guère sans fente. Désormais, nous savons pourquoi.

Pour revenir aux voiles souples, pensez à la dernière fois que vous avez constaté le guindant déventé, avec la grand-voile réglée correctement. La partie déventée de la grand-voile n'est pas inversée par des rafales de vent. Au lieu de cela, comme vous pouvez le

remarquer, elle se gonfle et se dégonfle lentement sous la pression de très petites forces – deltas de pression d'un côté à l'autre – qui la tirent (sous le vent) et la poussent (au vent). La réalité est que l'écoulement à travers la fente (entre le foc et la GV) est inférieur à l'écoulement à l'intrados dans la zone d'inversion. Par définition, cela signifie que la pression à l'extrados, sur cette partie avant de la grand-voile, est supérieure à celle exposée au vent. C'est contre-intuitif. La déflexion du flux et la circulation sont les raisons pour lesquelles le fluide semble appréhender le profil et modifier sa trajectoire avant même qu'il n'atteigne le profil. Ce phénomène est mis en évidence quand on roule en voiture dans une tempête de neige où la neige est projetée vers le haut avant d'atteindre le capot. En voile, le phénomène se manifeste à la fois dans l'eau et dans l'air. « Pressentant » que la voile approche, l'air fléchit sa trajectoire sous le vent en prévision de celle-ci. En fait, comme les molécules sont contraintes de changer de direction, elles s'accumulent devant la voile. L'eau, qui arrive sur la quille du côté opposé (sous le vent) à cause de la dérive du bateau, détecte également la quille et infléchit sa trajectoire en prévision de celle-ci. La déflexion de l'air au vent ou une refusante est le phénomène inverse. En outre, le foc et la grand-voile ont chacun leurs propres champs de circulation comme le montre la figure 4.1. On peut voir comment les deux champs de circulation s'opposent dans la fente et ont tendance à s'annuler.

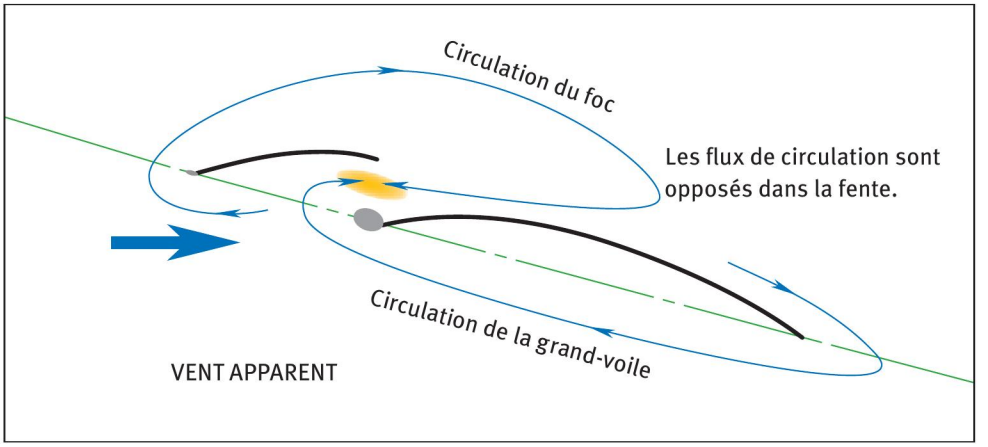


Figure 4.1 Champs de circulation du foc et de la grand-voile.

Ainsi, la vitesse de l'air n'est ni accélérée ni « revitalisée » comme prétendu par l'ancienne théorie de la fente. Une grande partie de l'air censée passer à travers la fente est en fait déviée par les champs de circulation combinés, de sorte que cet air se déplace sous le vent du foc. C'est le phénomène de déflexion de l'air sous le vent en pleine action.

Si vous avez du mal à imaginer la déflexion sous le vent (une adonnante) et la déflexion au vent (une refusante), considérez ceci : la déflexion sous le vent du foc est identique au phénomène qui rend le positionnement de défense sous le vent souhaitable (fig. 4.2). Et dans ces deux situations, cela revient à une augmentation de la vitesse du vent à un angle favorable. Non seulement le bateau A en position de défense sous le vent bénéficie de la déflexion de l'air sous le vent, mais aussi son plan de voile se trouve dans une zone d'écoulement à haute vitesse créée par le bateau au vent (bateau B). Sa VMG est donc meilleure que le bateau B et supérieure à tous les autres voiliers de la flotte ne se trouvant pas dans une position de défense sous le vent (toute chose étant égale). À tout point de vue, la position du bateau A est comparable à la position du foc dans un plan de voilure.

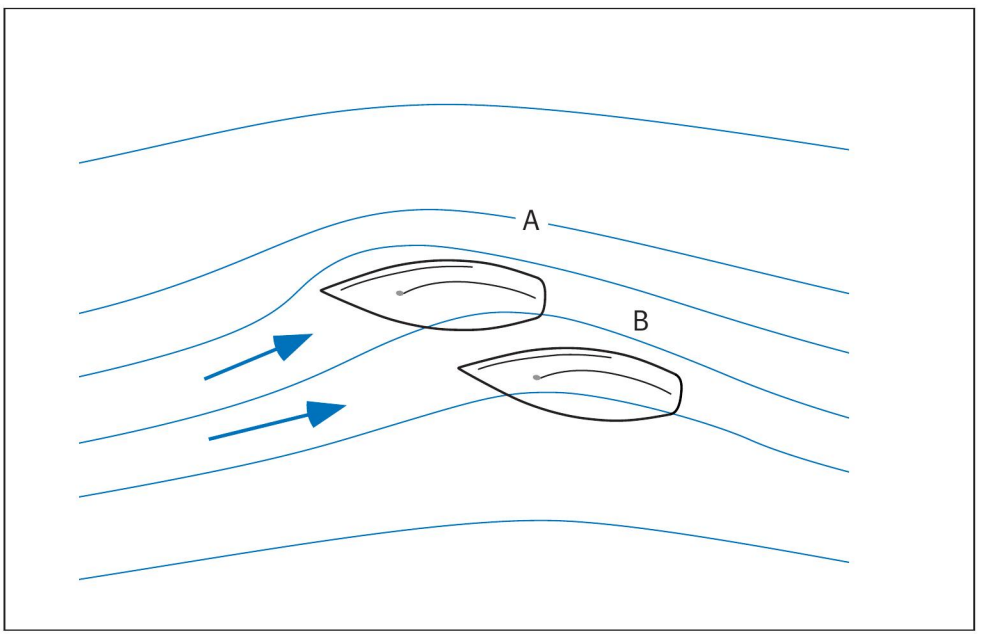


Figure 4.2 Le bateau A, en position de défense sous le vent, navigue plus vite que le bateau B, mais il est aussi plus rapide que tous les autres bateaux qui se ne trouvent pas en position de défense sous le vent, tous les paramètres (vent, état de la mer, taille du bateau) étant égaux par ailleurs.

Interaction des forces : vue d'ensemble

Une voile d'avant correctement réglée ralentit l'écoulement dans la fente. Pourquoi est-ce une bonne chose ? Parce que le flux sous le vent de la grand-voile ne décroche pas quand elle est bordée à un angle serré. Une grand-voile correctement réglée positionne le foc dans une adonnante et accélère l'écoulement sur la chute du foc, ce qui fait de cette dernière une voile bien plus efficace. L'accélération de l'écoulement combinée aux conditions de Kutta plus facilement satisfaites pour le foc dans une zone d'écoulement à grande vitesse signifient que l'écoulement autour du foc est moins susceptible de décrocher. Encore une fois, un principe de réglage des voiles est d'éviter la séparation.

COMMENT LA GRAND-VOILE AFFECTE LE FOC

L'écoulement en amont de la grand-voile déplace la position du point de stagnation du foc au vent (cela suppose d'avoir des voiles souples et correctement réglées). Le foc se trouve alors dans une adonnante relative, et le bateau peut ainsi naviguer plus haut sans que le foc ne dévente. Le même phénomène provoque un écoulement plus rapide sous le vent du foc et augmente la portance, par rapport à un foc sans grand-voile. En outre, les vitesses plus élevées sous le vent du foc permettent à la voile de fonctionner à des angles d'attaque encore plus élevés (c'est-à-dire une voile plus bordée, ce qui crée donc un potentiel plus élevé pour une portance nette) avant que l'écoulement au vent du foc ne se sépare et ne décroche.

COMMENT LE FOC AFFECTE LA GRAND-VOILE

La présence du foc déplace le point de stagnation de la grand-voile vers le bord d'attaque du mât, plaçant ainsi la grand-voile dans une refusante en raison de la déflexion de l'air au vent. En conséquence, l'augmentation de la pression sous le vent de la partie avant de la grand-voile est considérablement réduite, ce qui empêche la bulle de séparation de grossir sous le vent de la voile qui pourrait causer une séparation. Rappelons que c'est le delta des Cl selon la hauteur de la voile qui est la principale cause de la traînée induite (chapitre 3). Tout ce qui peut contribuer à uniformiser ces deltas est favorable à la VMG. En outre, avec la vitesse du flux plus faible à l'avant de la fente, la traînée du mât est réduite. Même si la voile d'avant contraint la grand-voile à naviguer dans une refusante et nécessite d'être bordée plus près de la direction du vent réel, la probabilité de traînée induite liée aux tourbillons du bord de fuite de la grand-voile s'en voit réduite. En effet, le delta de pression sur la chute de la grand-voile est réduit tout comme au niveau de sa partie avant grâce au foc.

À LA SURFACE ET SOUS L'EAU

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, en faisant voler une plaque, les forces aérodynamiques sont créées lorsqu'un profil dévie l'écoulement d'air. Celles-ci comprennent les tractions relativement fortes (pression négative ou aspiration) sous le vent et les poussées relativement faibles (pression positive) au vent. Si l'on additionne l'amplitude et la direction des fortes tractions et des faibles poussées, les forces peuvent être réduites à un seul vecteur de force (V_{TOTAL}), appliqué au centre d'effort du plan de voilure (fig. 4.3). S'il n'y avait pas de traînée, le vecteur force V_{TOTAL} serait perpendiculaire au vent apparent. Mais, à cause de la traînée, l'angle est toujours plus ouvert que la perpendiculaire. Pour clarifier ce point, on peut décomposer ce vecteur en deux forces équivalentes qui, lorsqu'elles sont additionnées, sont égales à la force de la voile (V_{TOTAL}) (fig. 4.4). Ces deux forces sont la force propulsive ($P_{PROPULSION}$) et la force de gîte/latérale ($V_{GÎTE}$). La force de propulsion est le résultat de toutes les forces aérodynamiques qui poussent le bateau vers l'avant. La force de gîte pousse le bateau perpendiculairement à sa direction et le fait gîter. Au regard des vecteurs $V_{GÎTE}$ et $P_{PROPULSION}$, notons que la force de gîte est environ quatre fois supérieure à la force de propulsion sur un bord de près. Voilà une des raisons pour lesquelles on se met au rappel au vent sur les dériveurs et quillards de course, et pourquoi le matossage des voiles – lorsque les règles le permettent, comme dans la Volvo Ocean Race – est si efficace. L'augmentation du moment de redressement

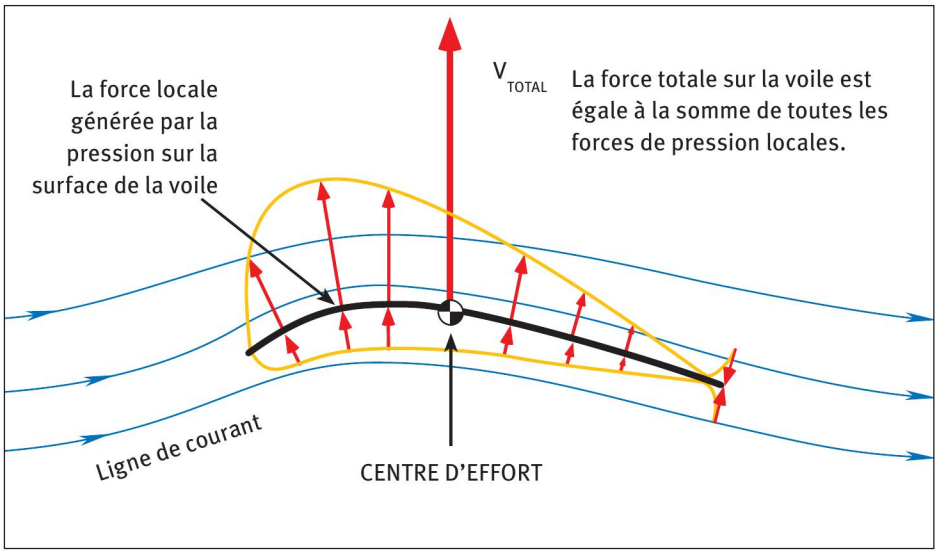
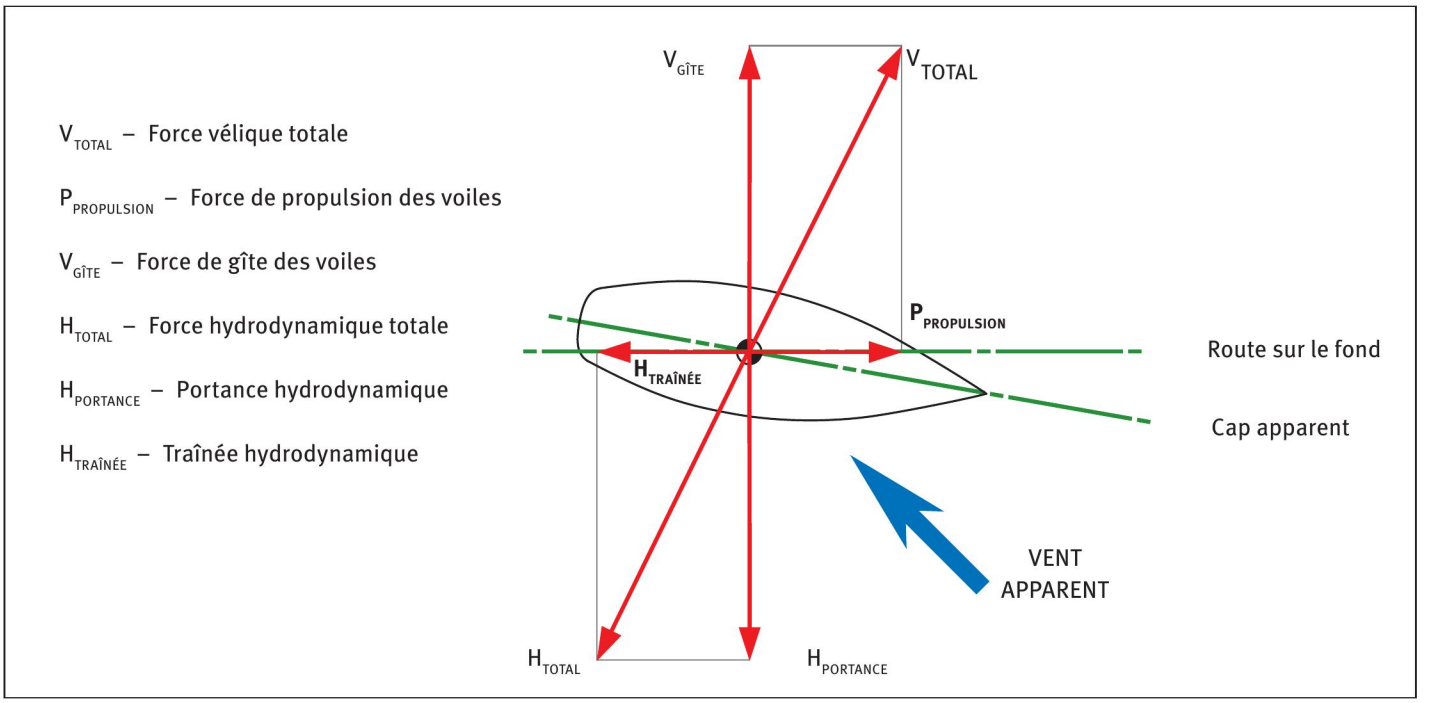


Figure 4.3 Les poussées et tractions sur une voile, réduites à un seul vecteur (V_{TOTAL}).

du bateau qui en découle permet de créer une plus grande force de propulsion, sans augmenter la gîte.

La fonction principale d'une quille (y compris les variantes : quille basculante, dérive centrale ou latérale, parfois combinées) est d'empêcher le bateau de glisser latéralement dans la direction de la force de gîte. Sans ces appendices, les voiliers seraient incapables de naviguer à moins de 90 degrés d'AWA. La quille est un profil, et la façon dont elle interagit avec l'eau est comparable à la façon dont la voile interagit avec le vent. En altérant la trajectoire de l'écoulement de l'eau, la quille produit une force ($H_{PORTANCE}$) qui s'oppose à la force de gîte du plan de voilure. La quille, les safrans et surtout la coque produisent beaucoup de traînée lorsqu'ils sont entraînés à travers l'eau par les voiles. Cette force de traînée ($H_{TRAÎNÉE}$) est la force qui s'oppose au déplacement vers l'avant ($P_{PROPULSION}$) du bateau. Lorsque le bateau se déplace à une vitesse constante, les forces aérodynamiques des voiles et les forces hydrodynamiques des œuvres mortes s'équilibrent. La force de traînée hydrodynamique ($H_{TRAÎNÉE}$) et la force de propulsion des voiles ($P_{PROPULSION}$) sont de même amplitude et opposées. Si la force de propulsion générée par les voiles croît, avec une pression d'air soudaine plus élevée, la force de propulsion sera temporairement plus importante que la traînée hydrodynamique, et le bateau accélèrera. Si la force générée par les voiles diminue, le bateau ralentia jusqu'à ce que les forces s'équilibrent à nouveau.

Figure 4.4 Équilibre des forces aérodynamiques et hydrodynamiques



Le matossage des voiles, sur le pont comme à l'intérieur, à chaque changement d'amure (virement et empannage) est une caractéristique propre à la Volvo Ocean Race, course autour du monde. Ce transfert de poids additionnel au vent s'oppose à la valeur S de gîte ; autrement dit, une gîte excessive est généralement peu performante. Il s'agit de *Puma Ocean Racing powered by Berg Propulsion* et skippé par Ken Read, président de North Sails, dans la Volvo Race 2011-2012. (Photo Amory Ross/Volvo Ocean Race.)

La dérive

Des voiliers dotés de sections de quille symétriques ne se déplacent pas selon leur axe longitudinal, mais avancent en crabe et dérivent sous le vent. En effet, la force latérale ne parvient pas à s'équilibrer sous l'effet de la résistance de la quille. En jargon de voile, on dit que la route sur le fond est plus basse que le cap du bateau. Ce delta entre le cap du compas et la route sur le fond est appelé dérive. Dans 10 à 15 nœuds de vent, la dérive moyenne pour une configuration de bateau moderne typique est de 2 ou 3 degrés. Étant donné que la quille est alignée avec l'axe du bateau, cet angle de dérive équivaut aussi à l'angle d'attaque de la quille. Ce faible angle d'attaque est suffisant pour que la quille dévie le flux d'eau et engendre la force latérale ($H_{PORTANCE}$) mentionnée ci-dessus. Tout comme avec les voiles, sans l'angle d'attaque, on n'aurait ni déviation de l'eau ni portance générée par la quille.

Angle de safran optimal

Si l'écoulement était parfaitement stable et le plan d'eau plat, nous pourrions configurer un bateau sur lequel les forces créées par la quille et les voiles seraient parfaitement équilibrées, permettant au bateau de naviguer en ligne droite sans safran. Cependant, les conditions normales de navigation sont généralement tout sauf constantes. Le safran est donc nécessaire pour compenser l'équilibre instable entre la quille et les voiles, dû aux variations incessantes de la vitesse du vent réel (TWS) et de la direction du vent (TWD). Les vagues compliquent encore davantage la situation. En outre, presque tous les voiliers

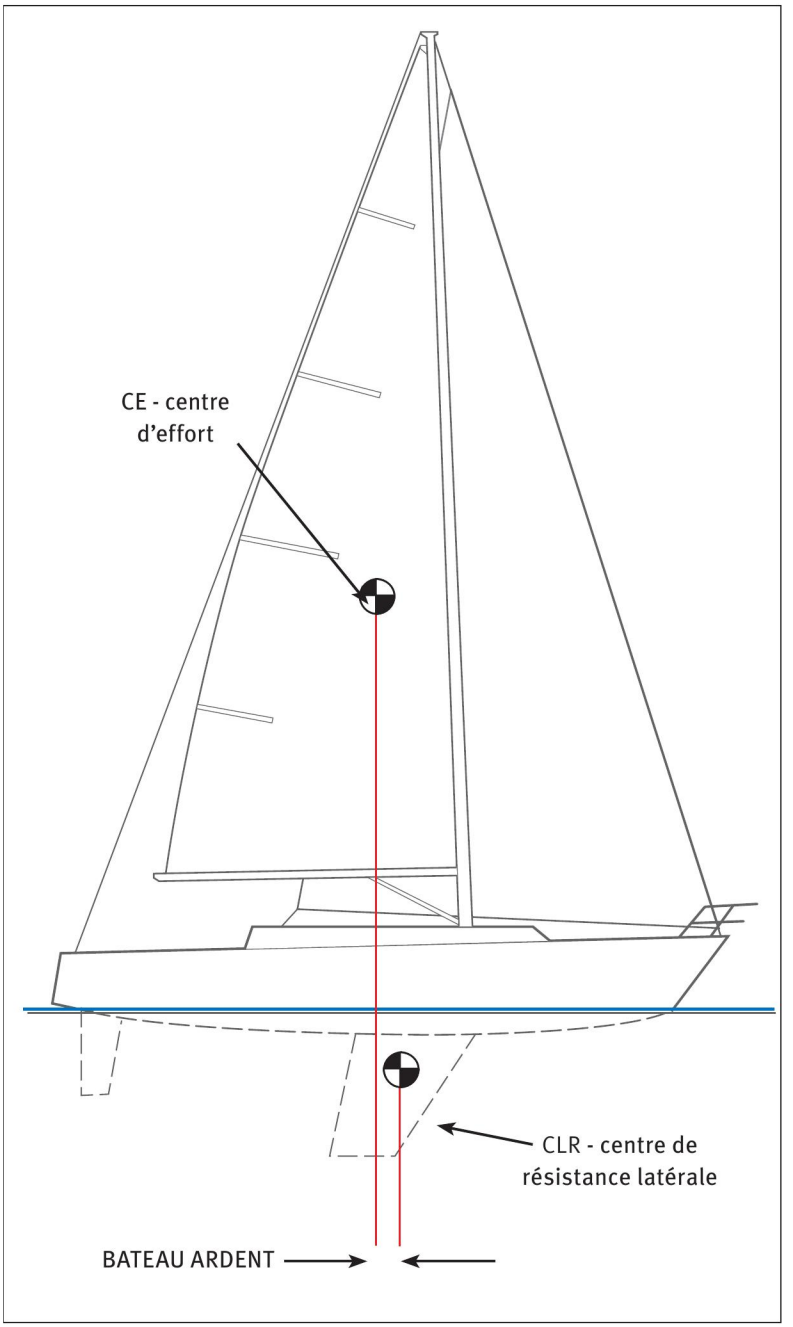


Figure 4.5 Relation entre le centre d'effort du plan de voilure et le centre de résistance latérale de la quille.

améliorent leur VMG au près en jouant délibérément sur la position et la quête du mât de manière à générer un peu d'angle de safran lorsque le bateau navigue en ligne droite. En d'autres termes, tous les voiliers doivent être un peu ardents, ce qui contraint à abattre légèrement.

Cet exercice d'équilibre délicat pour un voilier est illustré par la figure 4.5. La relation entre le centre d'effort (CE) des voiles et le centre de la résistance latérale (CLR) des œuvres mortes détermine cet équilibre. Si le CE du plan de voilure est parfaitement aligné avec le CLR des appendices et de la carène, le bateau aura une barre neutre. Il se déplacera en ligne droite sans aucun mouvement de barre. Si, cependant, le CE est en arrière du CLR, comme sur l'illustration, le bateau sera ardent. Pour maintenir un cap droit au compas, on devra tirer sur la barre. Si le CE est en avant du CLR, le bateau sera mou. Dans la figure 4.7, les forces sur la quille et le safran correspondent à un bateau ardent. Avec un bateau délibérément ardent, le safran a un angle d'attaque plus grand que l'angle de dérive du bateau[1].

L'angle d'attaque d'un safran est typiquement d'environ 3 degrés pour la dérive, auquel on ajoute 3 degrés pour compenser un comportement légèrement ardent, soit un total de 6 degrés. À cet angle, le safran peut dévier un flux d'eau plus important et par conséquent produire plus de portance[2]. Ce gain en portance du safran déplace le CLR de la coque légèrement vers l'arrière jusqu'à se placer directement dans l'axe du centre d'effort de la voile. Le bateau avance alors en ligne droite au compas avec un angle de barre/d'attaque du safran constant de 6 degrés, jusqu'à ce que le vent change à nouveau de direction.

Passons aux sections laminaires. Ce sera également l'occasion de faire le point sur les écoulements de couche limite. Si le bateau devient trop ardent, le safran connaîtra le même problème que celui évoqué pour les voiles : un trop grand angle d'attaque permet à la bulle de séparation de croître, et le safran finit par décrocher. La plupart des marins en ont fait l'expérience dans le gros temps au portant. Cependant, même dans le médium et par mer calme, un safran mal conçu – souvent le résultat de l'utilisation de sections laminaires – peut entraîner un décrochage du safran, et provoque un départ au lof. C'est un problème classique d'un écoulement laminaire par rapport à un écoulement turbulent.

Une section laminaire, parfois appelée « section critique », a un maître bau reculé, ce qui signifie que la position d'épaisseur maximale de la section est plus reculée. Les sections laminaires ne conviennent pas aux voiles, car l'écoulement laminaire est non seulement indésirable, il est aussi presque impossible à réaliser. C'est le nombre de Reynolds, un nombre adimensionné de la viscosité d'un fluide (essentiellement), qui en est responsable.

1 La dérive est définie et mesurée par des instruments selon la formule VB^2 x K (une constante) x cosinus de l'angle de gîte. VB étant la vitesse du bateau et K étant fonction du type de bateau.

2 L'angle de barre total au vent est fonction de la gîte, elle-même fonction de la force du vent. Dans le petit temps, il est difficile de rendre le bateau ardent. Dans la brise, les régleurs de voiles tentent au maximum d'atténuer ce comportement ardent. En outre, la déflexion de l'écoulement causée par la quille réduira légèrement l'angle d'attaque total du safran.

Un nombre de Reynolds faible dénote un fluide très visqueux, ce qui favorise un écoulement laminaire, alors qu'un nombre de Reynolds élevé caractérise un fluide à faible viscosité, ce qui suggère un écoulement turbulent. Le premier a un certain poids et de l'inertie, tandis que le second est chaotique et instable. Le nombre de Reynolds de l'eau est nettement inférieur à celui de l'air, ce qui signifie que les voiles de quille et peut-être les safrans peuvent bénéficier de ces sections laminaires au maître bau reculé. Alors, certains architectes navals sont tentés d'utiliser une section laminaire pour les safrans avec le double objectif de minimiser la traînée de frottement et de maximiser la longueur (mesurée en bas de la corde du safran) sur laquelle l'écoulement reste laminaire et non séparé. Il va de soi que ce sillage plus étroit – sillage causé par la séparation inévitable de la couche limite – réduit la traînée pour une portance donnée[3].

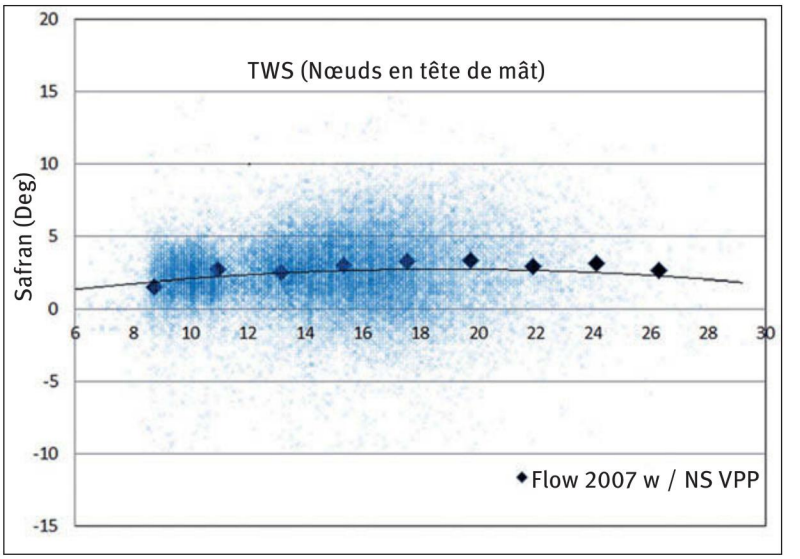


Figure 4.6 Même les bateaux menés par les meilleurs marins sont victimes de mouvements saccadés ou excessifs de la barre. Comparez les résultats des angles de barre anticipés pour un TP 52 à une vitesse de vent donnée (triangles bleus) avec les résultats mesurés, comme le montrent les nuages de points bleus.

Toutefois, lorsque le flux de la couche limite commence à décélérer une fois qu'il dépasse le maître bau, il est enclin à la séparation. Si cette couche limite était turbulente, il aurait moins tendance à se séparer. En tant qu'écoulement laminaire, il peut se séparer facilement, ce qui permet à la bulle de séparation de croître soudainement depuis le bord de fuite ou, plus probablement, depuis le bord d'attaque d'un safran, forçant la couche limite à décrocher de la totalité de la surface du safran. Cela va à l'encontre de l'un des objectifs de l'architecte. Pour les bateaux de course haute technologie, on va indéniablement jouer avec la limite de ce phénomène notamment pour les voiles de quille. Les architectes savent que ces bateaux sont menés par des barreurs et régleurs performants. De petits mouvements de barre réduisent ainsi le risque de décrochage. Les voiliers menés par un équipage moins expérimenté ont généralement des mouvements de barre plus grands, ce qui peut faire décrocher la section du safran à écoulement laminaire. Par conséquent, les architectes navals sont prudents quant aux limites de ces sections laminaires. De toute évidence, ils n'envisageraient pas cette option pour un croiseur rapide, et encore moins pour un voilier de croisière classique.

Comme les bateaux de haute technologie sont à l'affût du moindre gain de performance, il est primordial de bien comprendre le concept d'angle de barre. La figure 4.6 montre un graphique d'angles de barre d'un TP 52 (dérive non incluse) selon différentes vitesses de vent. Ce bateau a constamment bénéficié d'un équipage expert et de réglages optimaux. Pourtant, on remarque des disparités importantes pour chaque vitesse de vent. Preuve en est que tous les paramètres suivants : vent, vagues, manœuvres à la barre, réglage et mouvements de l'équipage affectent constamment l'équilibre du bateau.

Si l'architecte naval maîtrisait parfaitement les angles de barre, il pourrait peut-être tendre un peu plus vers une section de safran laminaire. Au cours de la Volvo Ocean Race 2011-2012, *Puma*, le bateau skippé par Ken Read, président de North Sails, était muni d'un capteur placé sur la quille pour mesurer la dérive. Il se peut qu'un jour des capteurs GPS d'une grande précision comme ceux utilisés dans la dernière Coupe de l'America soient suffisamment abordables pour permettre à un bateau de mesurer la dérive en détectant la différence de position entre la proue et la poupe. Il s'agit de mesurer une différence de l'ordre de 25 mm. On doit également prendre en compte les effets du courant.

La direction de la force induite par le safran est similaire à celle de la force créée par la quille. Quand le bateau est ardent, le safran contribue à contrer la force de gîte des voiles avec la quille. Quand il est mou, le safran s'oppose à la quille, ce qui contraint la quille à contrecarrer les forces de gîte venant à la fois du safran et des voiles.

3 Le nombre de Reynolds est utilisé pour comparer l'écoulement d'un fluide autour de différents profils en normalisant la nature visqueuse de ce fluide. Il permet d'obtenir une échelle plus précise.

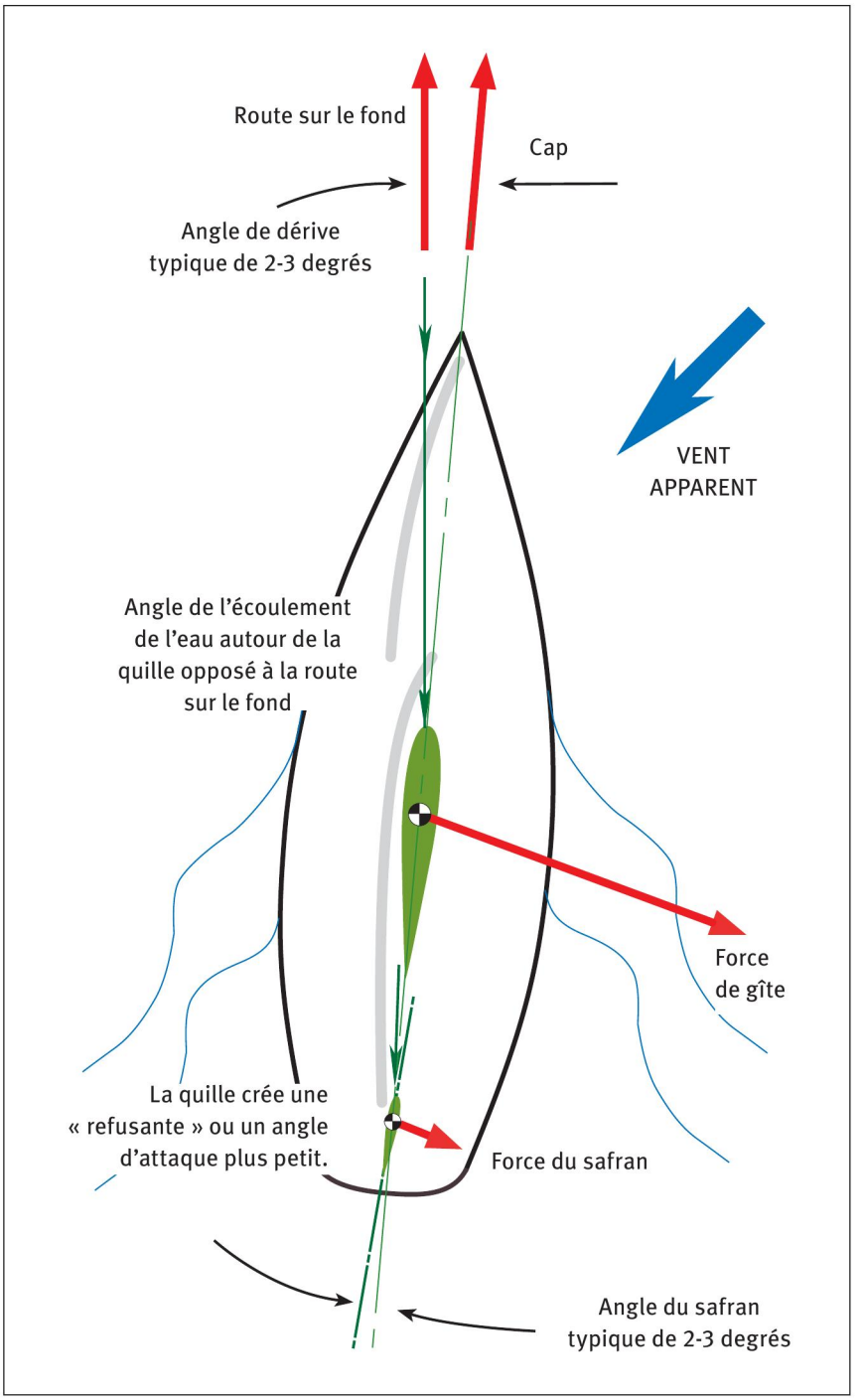


Figure 4.7 Les forces sur la quille et le safran pointent dans la même direction lorsque le bateau est ardent.

Un bateau ardent a un avantage supplémentaire parce que l'interaction entre la quille et le safran est similaire à la dynamique qui existe entre le foc et la grand-voile. Ainsi, en tirant la barre, par essence en réglant l'angle de safran, la déflexion du flux augmente l'angle d'attaque sur le voile de quille. Ce phénomène correspond à l'accélération du flux sous le vent de la voile d'avant. En d'autres termes, cela se traduit par plus de portance et moins de traînée. Autre remarque, la déflexion du flux par la quille sur le safran, et que subit également la grand-voile derrière la voile d'avant, réduit légèrement son angle d'attaque total.

Angle d'attaque

À présent, on prend mieux conscience des nombreuses façons de décrire les forces agissant autour des voiles, en fait, autour de n'importe quel profil. L'une des façons les plus simples est de distinguer les forces portance et traînée (fig. 4.8). La force de portance est, par définition, perpendiculaire à la direction du vent apparent ; et la force de traînée est parallèle à cette même direction. La manière évidente d'augmenter la portance d'une voile est d'augmenter son angle d'attaque. Plus la portance est grande, plus on génère de puissance.

Il existe deux options pour accroître l'angle d'attaque : le réglage ou abattre sans choquer les voiles. Il importe de savoir que plus l'angle d'attaque est grand, ou en d'autres termes, plus la voile dévie le flux d'air, plus la portance est élevée jusqu'à un certain point. La force de gîte et la séparation du flux sont deux conséquences fâcheuses d'un angle d'attaque trop grand. La deuxième option pour augmenter la portance d'une voile est d'augmenter sa cambrure ou son creux, un sujet que nous examinerons ci-dessous. Aussi, dans les chapitres sur les voiles d'avant et les grands-voiles, nous discuterons du contrôle de la cambrure.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le bord d'attaque d'une plaque contraint le vent à le contourner de manière brutale. À l'arrière de la bulle de séparation, cette déflexion soudaine du vent force celui-ci à changer radicalement de direction, augmentant ainsi la probabilité d'une séparation de la couche limite. Une cambrure adéquate adoucit l'angle du virage. C'est par ailleurs un avantage de l'aile courbe d'un avion : faciliter le passage de l'écoulement sur l'aile pour que celui-ci reste attaché plus longtemps sur le profil. Il en est de même pour l'aile rigide d'un voilier, telle qu'aperçue probablement pour la première fois sur le Classe C australien *Miss Nylex* en 1971. Contrairement à l'ancienne croyance, la courbure du profil n'a pas pour effet de contraindre les particules d'air à parcourir une distance plus longue sur l'extrados.

Le réglage des voiles est cependant un exercice d'équilibre délicat. Une cambrure trop importante peut également poser problème, car le flux peine à rester attaché sur la section fortement courbée, et il est probable qu'il se sépare – la courbe douce évoquée ci-dessus se transforme en un virage en épingle à cheveux – et l'écoulement se décroche prématurément

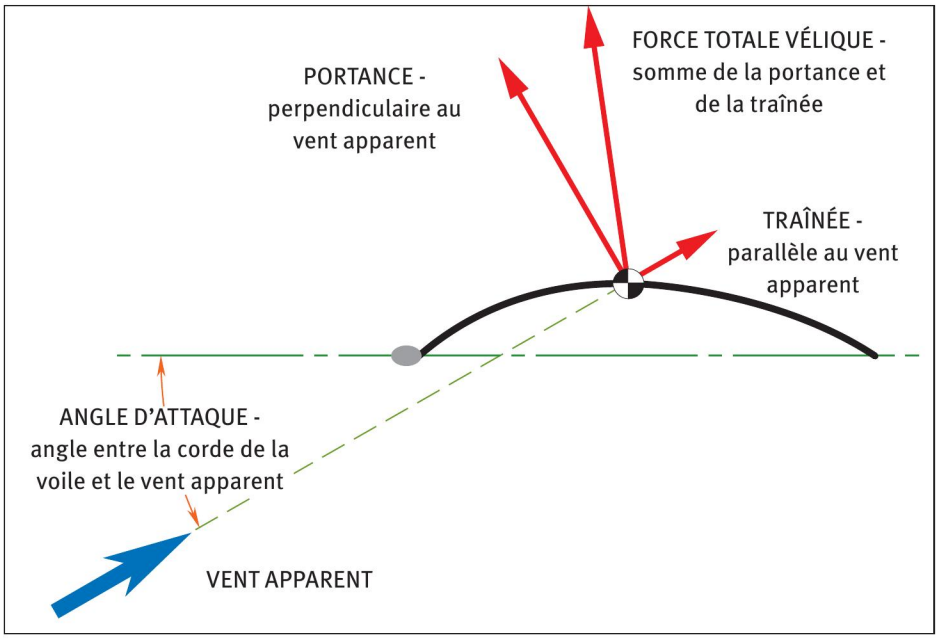


Figure 4.8 Illustration du vent apparent, de l'angle d'attaque, de la portance, de la traînée et de la force vélique totale.

de la voile. Une forte cambrure peut également diminuer la portance tout en augmentant la traînée encore plus rapidement. C'est pourquoi les toits à forte pente risquent moins d'être emportés par des vents violents. Avec un toit en pente (l'équivalence d'une cambrure marquée), la couche limite du vent peine à contourner le sommet du toit et décroche. Donc le flux ne reste attaché que sur la moitié du toit, au plus. Avec un toit à faible pente, l'écoulement peut rester attaché sur l'ensemble du toit.

En pratique, créer plus de portance pour les marins est un jeu d'enfant. Il suffit de surborder les voiles ou de naviguer plus bas que le réglage des voiles ne le voudrait (ces deux cas de figure augmentent l'angle d'attaque), ou encore de naviguer avec des voiles trop creuses (trop de volume) pour les conditions en question[4]. Malheureusement, le réglage des voiles est une tâche ardue parce que son indésirable acolyte – la traînée – neutralise l'effet de la portance. Réduire la traînée est la partie complexe, essentiellement parce que cette force est difficilement palpable.

Le diagramme du rapport portance/traînée (la courbe supérieure sur la figure 4.9) montre l'évolution simultanée de ces deux composantes. Notez que le meilleur rapport portance/traînée (c'est-à-dire la plus forte proportion de la force de la voile ou des voiles qui va propulser le bateau) se situe seulement à mi-hauteur de la courbe de portance. Au point où la portance est à son maximum (courbe du milieu), le rapport portance/traînée a déjà chuté considérablement. Il faut garder à l'esprit que les voiles de bateau n'ont pas tendance à décrocher aussi brusquement que les ailes d'avion haute performance. Il est donc difficile de détecter un point distinct de décrochage.

Les penons du guindant de génois sont des indicateurs approximatifs de ce rapport portance/traînée, au moins d'un point de vue de l'angle d'attaque. Nous savons maintenant que c'est le point essentiel dans le réglage des voiles. Lorsque le penon au vent flotte légèrement vers le haut, le rapport portance/traînée atteint son point culminant (fig. 4.10). À mesure que l'angle d'attaque des voiles augmente, les penons au vent et sous le vent commencent à voler. Ici, la portance est proche de son maximum, mais au détriment de la traînée. Il en résulte un rapport portance/traînée inférieur. En continuant à augmenter l'angle d'attaque (en bordant les voiles ou en s'éloignant du vent sans choquer), la couche

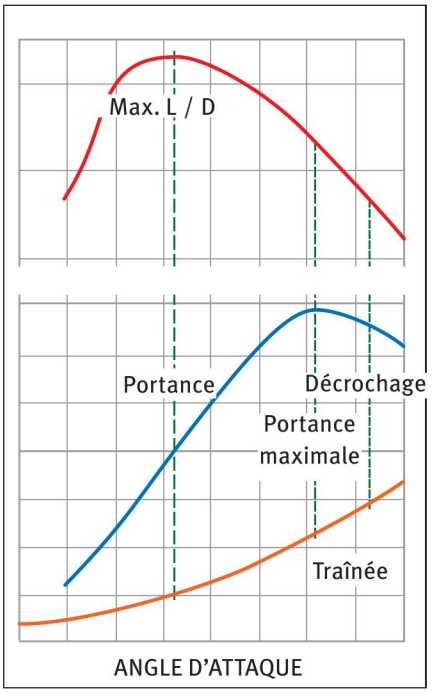


Figure 4.9 Courbes graphiques de la traînée, de la portance et du rapport portance/traînée (adapté à partir d'un dessin publié dans *AeroHydrodynamics of Sailing* de C. A. Marchaj).

4 Dans certaines conditions, les voiliers atteignent une meilleure VMG en bordant les voiles très fermement et en naviguant légèrement abattu sur un mode bas. Dans d'autres conditions, ils améliorent leur VMG en creusant davantage les voiles et en naviguant sur un mode haut.

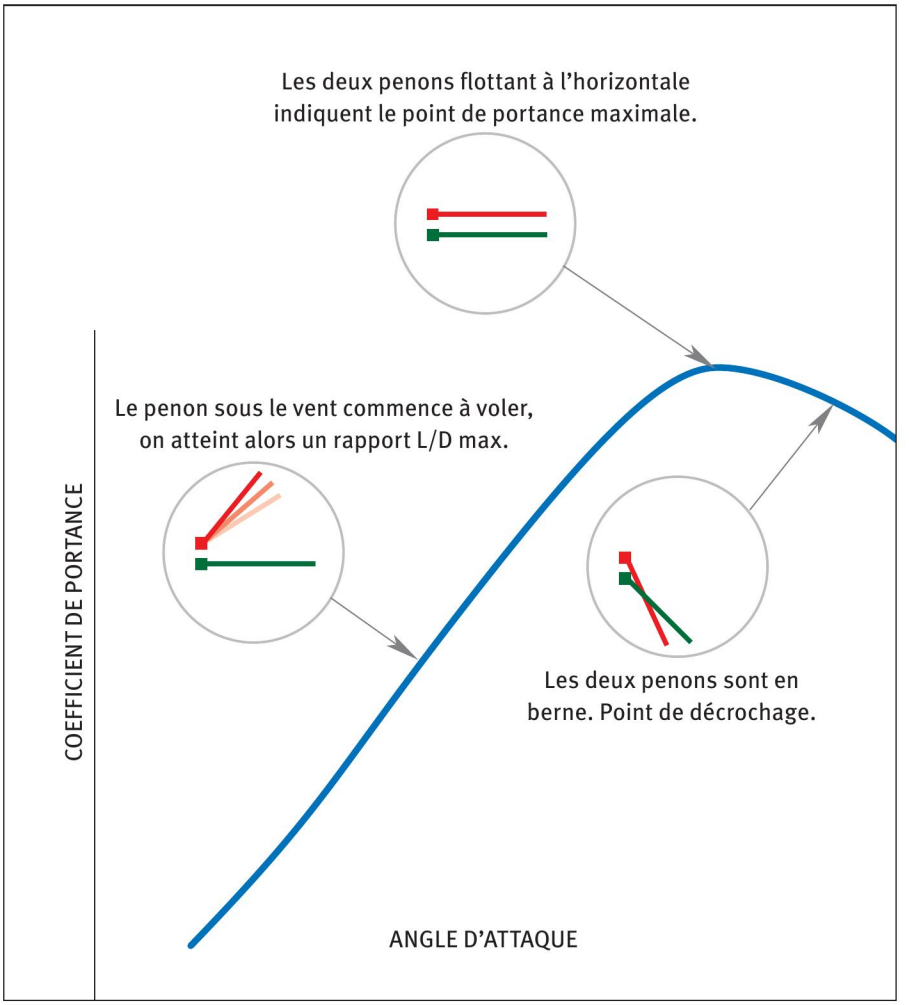


Figure 4.10 Penons (indicateur basique de la direction de l'écoulement) et tendance du bateau sur sa courbe de portance.

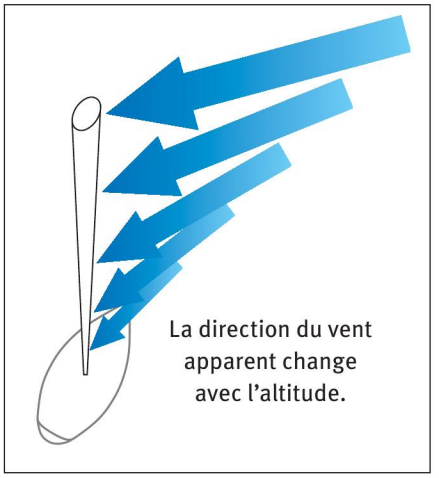


Figure 4.11 Vue d'ensemble du changement de direction du vent apparent et de la vitesse du vent en fonction de la hauteur du mât. Notez la direction et la longueur des flèches.

limite se sépare. Le flux total peut également décrocher. Cela se traduit dans le schéma par les deux penons qui décrochent.

D'aprés ce qui précède, il semblerait que le premier angle d'attaque – le penon au vent qui flotte – est optimal au près. C'est exact à l'exception d'un point supplémentaire. Cet angle d'attaque particulier ne génère pas toujours la meilleure vitesse à la bouée (VMG)[5]. Il faut souvent un surplus de portance, même si l'on a plus de traînée, pour atteindre la vitesse de carène du bateau ou pour donner plus de puissance dans le clapot (voir notre discussion sur les catamarans de la Coupe de l'America).

Par exemple, par mer plate dans le médium, si la grand-voile est réglée de telle sorte que son rapport portance/traînée diminue, cette perte pourrait être bien plus que compensée par une augmentation de l'angle d'attaque du safran, ou parce qu'une plus grande portion de la force totale est transformée en force propulsive. C'est pourquoi les voiliers de course modernes ont la particularité d'avoir deux modes de vitesse au près : sous-toilé (généralement défini comme ne nécessitant pas tout l'équipage au rappel) et bien toilé (tout l'équipage au rappel). Dans le premier cas, on accepte volontiers plus de portance au détriment de plus de traînée, parce que la force de gîte n'est pas limitante. En revanche, une fois bien toilé, la force de gîte devient un paramètre clé dans le réglage des voiles.

Comme mentionné ci-dessus, générer de la portance est chose aisée ; par contre, la difficulté est de minimiser la traînée et d'éviter la séparation du flux d'air. De toute évidence, la traînée réduit la force propulsive. Elle augmente la quantité de force latérale (gîte) pour une quantité donnée de portance, et cette augmentation de gîte peut compromettre les facteurs qui contribuent à l'équilibre du bateau : la quille, le safran, la coque et les ballasts.

Il faut garder à l'esprit que cette discussion se concentre sur la navigation au près. Lorsque l'on navigue à des angles très bas au portant (angle de vent apparent élevé), l'objectif est d'augmenter la traînée ou de bloquer l'écoulement du vent. Aux allures de largue, c'est une combinaison des deux configurations, et le fait que la traînée devienne un avantage plutôt qu'un handicap, comme c'est le cas au louvoyage, est l'une des raisons pour lesquelles naviguer 90 degrés du vent au largue est l'allure la plus rapide. Une autre raison est qu'au vent de travers, les forces des voiles (V_{TOTAL} à la figure 4.4) pointent davantage dans la direction (Propulsion) du bateau, améliorant la force propulsive et réduisant la force de gîte (Gîte).

5 La VMG (vitesse dans l'axe du vent ou *Velocity Made Good* en anglais) est définie comme le cosinus de la TWA x VB. La plupart des instruments calculent ces données. Cependant, on sait bien qu'il s'agit d'un mauvais indicateur de performance, car il y a toujours un décalage dans le temps avec la situation donnée. Mieux vaut apprendre à tenir compte de la vitesse cible sur les instruments de mesure. La vitesse cible est la vitesse optimale pour une TWA ou TWS donnée, ou encore la vitesse à laquelle la VMG de votre bateau (au près comme au portant) est maximisée. Le but est de faire correspondre la vitesse du bateau à la vitesse cible.

Caractéristiques verticales du vent

Il semble clair à présent qu'il existe un frottement de fluide – viscosité – lorsque le vent passe autour et le long d'une voile. Reynolds l'a quantifié. De même, il y a friction lorsque le vent passe au-dessus de la terre ou de l'eau. Comme la vitesse du flux d'air augmente par couches successives dans la couche limite d'une voile, la vitesse et la direction du vent augmentent à mesure qu'on s'élève au-dessus de l'eau (fig. 4.11). En fait, c'est ce qu'on appelle la couche limite terrestre. Plus la vitesse du vent est élevée, plus ce delta diminue. Les calculs de North Sails indiquent une augmentation de 50 pour cent de la vitesse du vent entre 1 et 35 mètres de hauteur. Voilà pourquoi, au grand dam de tout marin qui navigue au près sur un voilier de 30 pieds (9 m) avec un mât d'une hauteur de 14 mètres environ et quasiment pas de vent, un bateau de 50 pieds (15 m) avec une hauteur de mât de 23 mètres sera nettement plus rapide. Car son gréement de grande taille bénéficie d'une pression plus élevée en haut, générant une force de propulsion plus importante que le bateau de petite taille.

La figure 4.11 illustre ce phénomène de gradient au moyen de vecteurs vent. Un vecteur représente la vitesse (par la longueur de la flèche) et la direction (par l'orientation de la flèche). La somme des vecteurs de la vitesse bateau et de la vitesse du vent indique qu'avec une vitesse constante du bateau une hausse de la vitesse TWS augmente l'AWA[6]. En d'autres termes, le vent a un vrillage vertical naturel de bas en haut. Typiquement, ce vrillage est d'environ 3 à 5 degrés sur un 40 pieds, mais peut varier en fonction de la température de l'eau et de l'air. Une autre façon de décrire ce phénomène est qu'au fur et à mesure que la vitesse augmente avec la hauteur, soit le gradient, il y a un changement analogue de l'angle de vent apparent (AWA) que perçoit le plan de voilure. La figure 4.12 illustre cette relation à une vitesse de vent réel de 11,4 nœuds. La hauteur du mât d'un TP 52 y est représentée.

Le vrillage naturel du vent est un facteur pris en compte par les dessinateurs et régleurs de voiles. Les dessinateurs de voiles intègrent du vrillage aux dessins des voiles en partie pour tenir compte du gradient de vent, mais surtout pour minimiser la traînée induite. Le vrillage peut être défini comme la variation de l'angle des lignes de corde des sections d'une voile à l'axe du bateau à différentes hauteurs de la voile. Grâce au chapitre précédent, nous savons qu'un Cl constant minimise la traînée induite. Rappelons que la forme de traînée induite la plus nuisible est le tourbillon marginal si dominant en tête de voile. Si les dessinateurs et régleurs de voiles n'introduisaient pas un vrillage progressif, le Cl chuterait soudainement, puisque le flux tente de s'échapper du côté des hautes pressions au vent au-dessus de la chute au côté des basses pressions sous le vent.

Afin de réduire progressivement la portance, il est nécessaire d'accentuer le vrillage des voiles par rapport aux 3 à 4 degrés naturels du vrillage de gradient, c'est-à-dire à environ 12 à 14 degrés pour une grand-voile dans 12 nœuds de TWS et 18 degrés pour une voile d'avant. Cela diminue l'angle d'attaque, et par conséquent le delta de pression. En termes techniques, le vrillage décroît la différence de Cl sur toute l'envergure[7]. C'est la raison pour laquelle en moyenne le vrillage dans une grand-voile est d'environ 10 à 12 pour cent supérieur au gradient de vent.

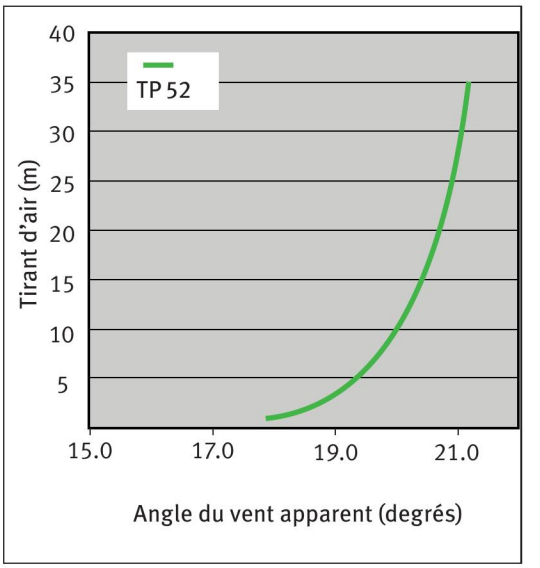


Figure 4.12 On note une différence de l'angle de vent de 3 degrés environ entre le niveau de la mer et le haut du mât d'un TP 52.

6 Dans les vagues, le bateau tangue. Le haut du mât peut alors se déplacer plus vite ou plus lentement que sa partie basse. Comme cela affecte la direction du vent, les régleurs de voiles devraient, en théorie, adapter le vrillage en fonction du tangage du bateau dans la forte et longue houle. Rappelons certains termes utilisés ici : le vent réel est le vent que vous ressentez lorsque le bateau est à l'arrêt ; le vent apparent est le vent que vous ressentez sur un bateau en mouvement. La vitesse et l'angle du vent apparent sont la somme vectorielle du vent réel à laquelle on ajoute la vitesse du bateau et le cap.

7 Dans 8 nœuds de vent réel (TWS) sur un bateau de course moderne à gréement fractionné, le vrillage de la grand-voile serait d'environ 10 degrés et de 17 degrés pour le foc. Dans 20 TWS, le delta est beaucoup moins élevé : 18 degrés pour la grand-voile (pour réduire la force de gîte) et 20 degrés pour le foc.

En ajoutant du rond de chute sur une grand-voile – la surface de voile au-delà de la ligne droite du point d'écoute au point de drisse –, on réduit le tourbillon marginal. La grand-voile est plus proche d'une forme elliptique (fig. 3.3, page 55). Les voiles d'avant, d'autre part, ont des formes en plan proches du triangle, habituellement avec un rond de chute négatif, même munies de lattes. Par conséquent, le tourbillon marginal pénalise fortement les voiles d'avant même si leur allongement plus élevé affaiblit la traînée induite totale pour une surface donnée. Le fait que la voile d'avant navigue dans une adonnante relative à la grand-voile n'a quasiment aucun rapport avec la nécessité d'accentuer son vrillage. La raison principale est de minimiser le delta Cl sur l'envergure en vrillant davantage la chute, essentiellement pour compenser la forme non elliptique de la voile d'avant par rapport à une grand-voile[8].

La grand-voile nécessite moins de vrillage aérodynamique car elle est plus elliptique et donc moins affectée par la traînée induite. Le fait qu'elle ait un angle de vent apparent relativement inférieur à la voile d'avant a peu d'impact. Finalement, les angles d'attaque de la voile d'avant et de la grand-voile sont assez similaires. La grand-voile perçoit une refusante relative, mais elle est plus bordée. Sur un gréement en tête, le delta de vrillage entre la grand-voile et la voile d'avant est moindre, principalement parce que le haut de la grand-voile sur un gréement en tête est affecté par la voile d'avant et ne se situe pas dans l'écoulement libre.

Cambrure et traînée induite

Le creux est également un outil que les dessinateurs de voiles et les régleurs utilisent pour contrôler le vrillage de chute et minimiser ainsi les tourbillons marginaux. La cambrure augmente la portance réalisable maximale pour un angle d'attaque donné. Le vrillage, quant à lui, réduit l'angle d'attaque et par conséquent diminue la portance totale.

Supposons, par exemple, un creux prononcé sur la partie inférieure d'une grand-voile (volume important), il est alors possible d'atteindre des valeurs de portance élevées. C'est une idée intéressante. En effet, la partie inférieure de la grand-voile est une zone de haute portance car les cordes des sections de la voile sont plus longues au bas du triangle. Cependant, juste sous la bôme se trouve un trou béant, un terrain fertile et favorable à la traînée induite. Donc, en réduisant progressivement le creux sur le huitième bas de la grand-voile, nous sacrifions un peu de portance, mais réduisons la traînée induite et améliorons de manière efficace le rapport portance/traînée, ou la force propulsive nette de la voile dans son ensemble. L'objectif est le même en ce qui concerne le vrillage sur la partie supérieure de la voile afin de réduire le tourbillon marginal tout en hauteur.

Dans les parties centrales d'une grand-voile (du milieu aux trois quarts supérieurs), les dessinateurs cherchent à obtenir les angles d'attaque les plus élevés et un creux suffisant pour générer un maximum de force totale. Si on s'intéresse à la partie haute de la voile, il est important que le creux soit relativement substantiel. En raison de sa faible surface, cette partie de la voile crée très peu de portance. Dans ce cas, la cambrure peut aider à maximiser la portance, sans oublier que nous devons réduire l'angle d'attaque afin de minimiser les tourbillons marginaux.

La cambrure sur la partie permet également d'éloigner la grand-voile de la traînée de forme du mât. Cela est particulièrement nécessaire au sommet du triangle, où les cordes de voile sont très courtes. Et une profondeur supplémentaire est également requise pour soutenir le vrillage, sans quoi la voile faseyerait au vent. Cela créerait une traînée de séparation.

Encore une fois, notre objectif est de conférer à la grand-voile une forme elliptique en répartissant le volume sur son envergure avec un creux plus faible dans sa partie inférieure et plus marqué dans sa partie supérieure. En substance, nous imitons le profil

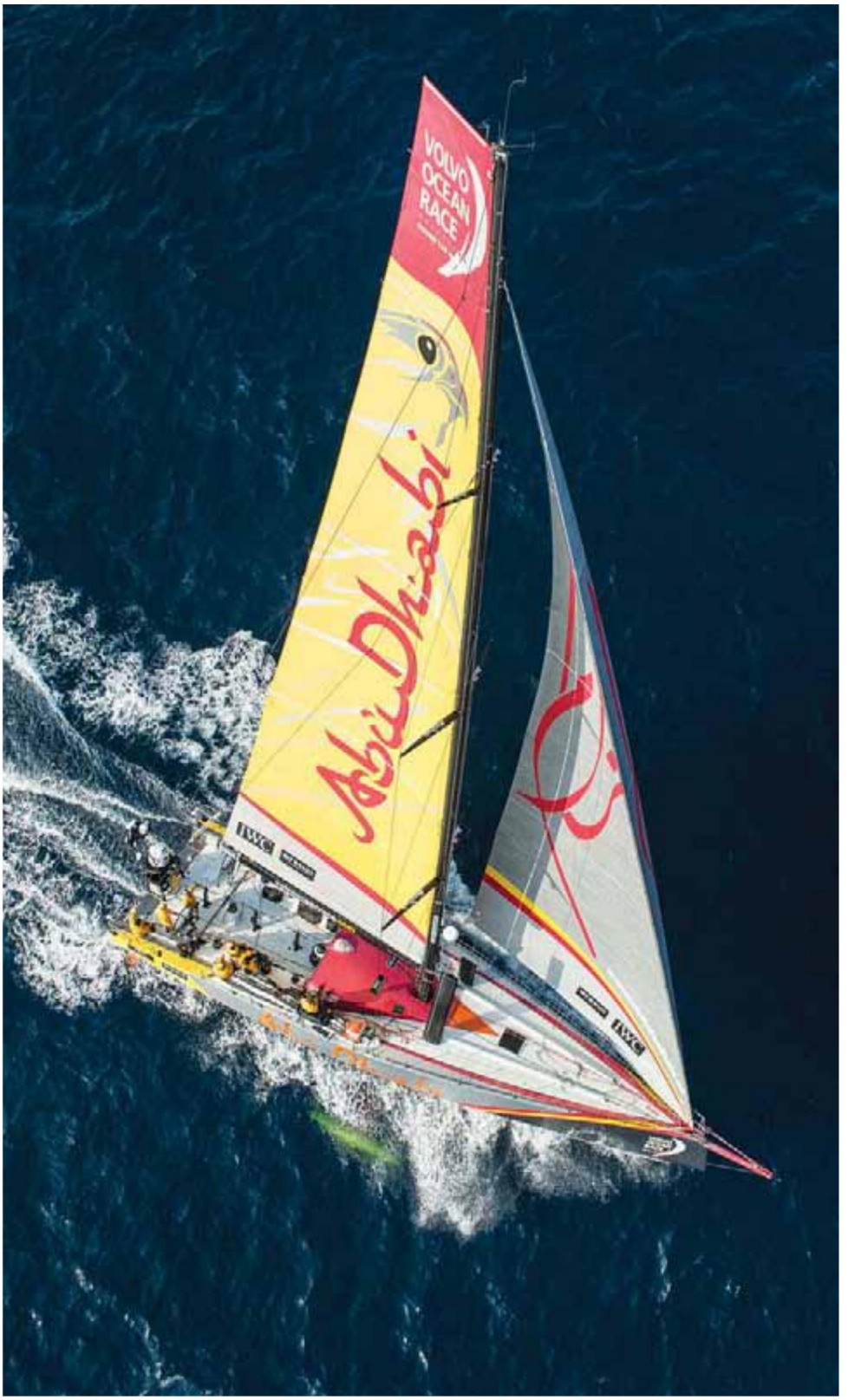
8 Les dessinateurs de voiles ont par conséquent ajouté du rond de chute sur la voile d'avant. Toutefois, les responsables de jauge se sont opposés à cette modification, de peur que les coûts des campagnes de voiliers de course soient trop élevés pour les propriétaires.

de l'aile de l'avion de Spitfire découvert il y a si longtemps par ces brillants aérodynamiciens.

Les dessinateurs de voiles utilisent d'autres techniques plus visibles que le creux et le vrillage pour minimiser la traînée induite et maximiser le rapport portance/traînée sur les voiles d'avant et grands-voiles. L'une d'elles est de faire en sorte que la bordure d'une voile d'avant touche le pont, ce que l'on peut voir sur presque tous les bateaux de course. Cette méthode empêche efficacement l'air de passer du côté haute pression au vent au côté basse pression sous le vent. Les aérodynamiciens l'appellent l'effet de plaque. Toutefois, cette option n'est pas appropriée pour le croiseur parce que le rond de bordure réduit considérablement la visibilité ; aussi, avec la plupart des systèmes d'arrisage et d'enrouleur de voiles d'avant, si populaires sur les bateaux de croisière, il est difficile de positionner le point d'amure du foc et, de ce fait, la bordure au niveau du pont.

Pour les croiseurs et les bateaux de course, l'allongement des voiles d'avant a également considérablement augmenté tout comme celui des gréements. Les voiles d'allongement élevé ont des parties hautes et basses plus faibles relativement au reste de la voile, et sont donc moins propices aux tourbillons marginaux, d'où le flux peut s'échapper. Par conséquent, la traînée induite est inférieure, et le rapport portance/traînée est plus élevé pour une surface de voile d'avant donnée.

Quant à diminuer la traînée induite de la grand-voile, il serait théoriquement préférable d'avoir une bôme qui effleure le pont. Comme pour la bordure de la voile d'avant, le pont et la bôme formeraient une étanchéité efficace, ce qui empêcherait l'air de fuir sous la bôme. Mais dans la pratique, cette option n'est pas envisageable pour des raisons de sécurité et d'ergonomie. Cette solution est comparable aux ailettes sur les quilles. Et de nombreux bateaux de compétition sont dotés de bômes larges et hautes pour la même raison. Cette idée remonte pour le moins au voilier Class J *Enterprise*, qui a



On peut observer le vrillage sur le haut de la chute ou à l'arrière du foc et de la grand-voile de ***Abu Dhabi***. Non seulement le vrillage doit correspondre au gradient naturel de la direction du vent le long du mât, mais il doit aussi contribuer à réduire au minimum le tourbillon marginal, en atténuant les changements du Cl le long de l'envergure de la voile, en particulier dans les sections supérieures étroites. Le vrillage peut être le meilleur ami du régleur de voiles. (Photo Victor Fraile Volvo Ocean Race.)

remporté la Coupe de l'America en 1930. Pour minimiser la traînée induite, le bateau a utilisé une bôme de 1,20 mètre de large surnommée « Park Avenue » en référence à cette large avenue au centre de Manhattan à New York. Plus tard, on a vu des tentatives épisodiques de bômes effleurant le point sur les 12M régatant dans la Coupe de l'America (1958-1987).

Des lattes intégrales, que les jonques chinoises utilisèrent pendant des centaines d'années, sont devenues populaires sur les voiliers de plaisance dans les années quatre-vingt en raison de leur effet bénéfique sur le rapport portance/traînée. Les skippers de catamarans de course ont été vraisemblablement les premiers à les avoir employées, suivis par les planchistes, puis les régatiers et les marins de croisière. Les lattes intégrales permettent d'avoir davantage de rond de chute donnant à la grand-voile une forme plus elliptique comme le Spitfire, une forme plus proche du U que du V, diminuant la traînée induite et améliorant le rapport portance/traînée.

Profil des quilles et traînée induite

De la précédente discussion, il apparaît clairement que la réduction de la traînée induite a une influence notable sur le profil de la quille des bateaux de course modernes et de nombreux voiliers de croisière. Par exemple, la quille moderne d'un croiseur ou d'un bateau de course présente un allongement élevé grâce à une surface réduite de son extrémité d'où le flux peut s'échapper. D'autre part, lorsque le tirant d'eau est contraint par les jauges, comme celle des 12M, ou lorsqu'un faible tirant d'eau est souhaitable pour les bateaux de croisière, les ailettes sont parfois utilisées pour minimiser la traînée induite. Cependant, il existe un compromis évident avec la traînée de frottement, en particulier dans le petit temps et dans toutes les conditions au portant. C'est pourquoi ajouter des ailettes à une quille, une mode rendue célèbre par les Australiens dans la Coupe de l'America de 1983, semble aujourd'hui désuet. Comme toujours en voile, tout est histoire de compromis.

L'élément *temps*

Imaginez une voile qui dévente, situation courante dans les manœuvres de pré-départ. Sans angle d'attaque, la voile est inutile ; il n'y a pas de portance, seulement de la traînée. Et il n'y a pas de tourbillon initiateur. Ensuite, la voile est bordée de 20 degrés, ce qui lui donne un angle d'attaque. Le flux tente de contourner le bord de fuite, mais à cause de la viscosité, il décroche. Cela prend un certain temps. Puis le tourbillon initiateur commence à entraîner le flux de circulation ; ceci représente notre petite roue qui fait tourner notre plus grande roue (chapitre 3). Faire tourner cette grande roue à pleine vitesse nécessite un certain temps. Plus les « roues » de circulation atteignent une vitesse suffisante rapidement, plus vite le voilier se met en route. Plus le plan de voilure est grand, tel que mesuré par sa longueur de corde moyenne, plus la roue de circulation est grande ; par conséquent, il faudra plus de temps pour générer de la portance.

D'autre part, plus il y a de vent pour faire tourner le tourbillon initiateur, plus le flux de circulation accélère rapidement, et plus vite la portance sur la voile se crée. Finalement, si l'écoulement est constant, la portance va se stabiliser à une valeur constante, connue sous le nom de *portance stationnaire*.

Combien de temps ce processus prend-il vraiment ? Atteindre 85 pour cent de la portance stationnaire dans 20 nœuds de vent prend environ 6 secondes ; à 10 nœuds, 12 secondes ; à 5 nœuds, 24 secondes. Bien que les chiffres ne soient pas absolus et ne représentent que des tendances, ce troisième temps explique pourquoi les marins compétents se déplacent délicatement et avec précaution dans le petit temps. Tout changement de réglage des voiles ou d'assiette du bateau requiert du temps pour atteindre un état stationnaire.

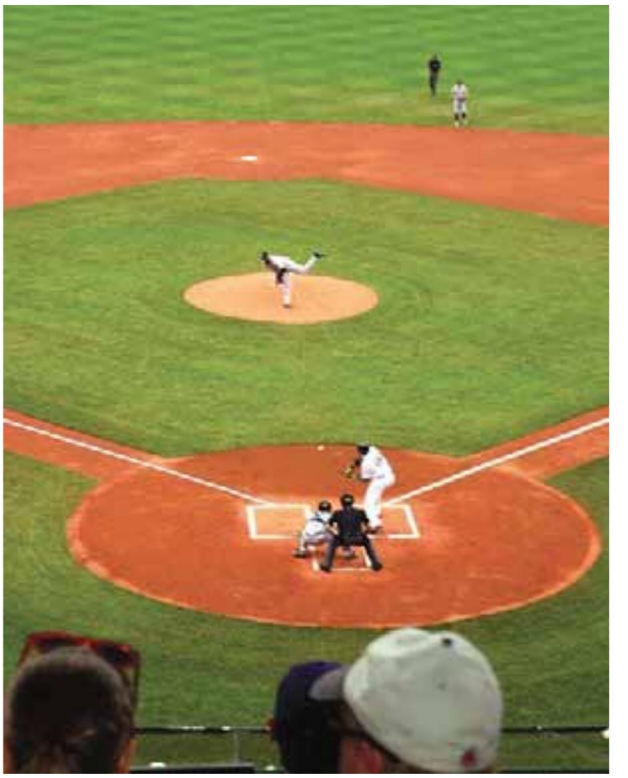
On comprend mieux pourquoi les régatiers de talent se distinguent des autres marins davantage dans le petit temps que dans le médium.

Ce laps de temps ne se limite pas au gonflage des voiles ; il s'applique à tout réglage de voile qui augmente ou diminue la portance. Combien de fois les paramètres sur un voilier

restent constants : pendant 10, 20 ou 30 secondes ? Presque jamais ! Si le vent change constamment de direction ou si les mouvements de barre sont incessants, alors les éléments ne se stabilisent presque jamais. Dans le cadre du réglage des voiles et des mouvements de barre, les marins expérimentés doivent sans cesse s'adapter aux évolutions instables pour atteindre les meilleures performances. Se rapprocher des réglages optimaux sans faire de changement inutile relève de l'expertise d'un marin compétent. Les nouvelles voiles de course, en fait, comme les voiles 3Di que nous allons examiner dans le chapitre suivant, nécessitent moins de réglage. C'est l'un de leurs atouts.

Les temps indiqués ci-dessus varient proportionnellement à la longueur de corde moyenne des voiles. Par exemple, les voiles avec une corde de 3 mètres permettraient d'atteindre le même pourcentage de portance en deux fois moins de temps. Voilà pourquoi les dériveurs sont plus réactifs que les gros bateaux. C'est aussi une raison pour laquelle les plans de voilure sur les bateaux de course et de croisière récents ont évolué vers des allongements plus élevés. Ils atteignent une portance stable plus tôt.

Le temps est aussi une notion clé dans la création de portance hydrodynamique. Les voiles de quille de différentes longueurs de corde se comportent différemment. Le voile de quille étroit, d'allongement élevé, et le safran suspendu d'un bateau de course moderne développent une portance plus rapidement que les bateaux aux larges quilles ou aux quilles de pleine longueur avec des safrans attachés. La vitesse à laquelle une portance se développe autour de ces quilles étroites expliquent également, en partie, leur comportement plus vif dans la houle. D'autre part, les bateaux avec des appendices plus traditionnels sont moins sensibles à la barre, puisque la circulation prend plus de temps à se former autour de ces longs profils.



Le temps est-il votre allié ? L'équipe de New York Yankees affronte les Red Sox de Boston au Fenway Park à Boston. Le moment et le lieu où la balle tombe sont deux paramètres cruciaux au baseball, comme le lift au tennis et au golf. (Photo Michael Levitt.)

Une quille étroite, mais profonde, et un safran suspendu et séparé assez reculé sont des tendances relativement récentes en architecture navale. Le premier bateau significatif doté de cette configuration était le Cal 40, un bateau de course océanique datant de 1964, conçu par Bill Lapworth pour le Cruising Club of America Rule. Le 12M *Intrepid*, à deux reprises le defender de la Coupe de l'America (1967 et 1970), était également muni de cette configuration. Avant ces deux bateaux, tous les 12 Mètres et la plupart des bateaux de course et de croisière avaient le safran apposé sur le bord de fuite de la quille.

Les sports de balle, comme le baseball, le golf et le tennis, ont leur propre version de la circulation. La balle au baseball ne tombe pas à moins de 4,5 mètres du frappeur ; elle s'affaisse près du marbre. Pour le lanceur de baseball, si la portance maximale est atteinte trop tôt, la balle risque de tomber par terre ou hors de la zone de frappe bien avant qu'elle n'atteigne le marbre ; si la portance maximale est atteinte trop tard, la balle pourrait s'envoler dans les places bon marché. On parle souvent d'« effet Magnus » dans le cas du navire Flettner (navire à rotors), du slice redouté au golf ou des frappes liftées au tennis.

USA
25555

Les voiles moulées en trois dimensions : 3DL et 3Di

L'un des progrès technologiques les plus notoires en voilerie est sans aucun doute la conception de voiles moulées en trois dimensions (3D). L'avènement de ces technologies dans l'industrie – connues sous le nom de 3DL (1990) et 3Di (2007) – est un récit fascinant, mêlant prise de risque, succès et innovation technique. L'histoire commence en 1990 lorsque Jean-Pierre Baudet et Luc Dubois, deux jeunes collaborateurs de North Sails, d'origine suisse, imaginaient l'avenir de la voilerie autrement.

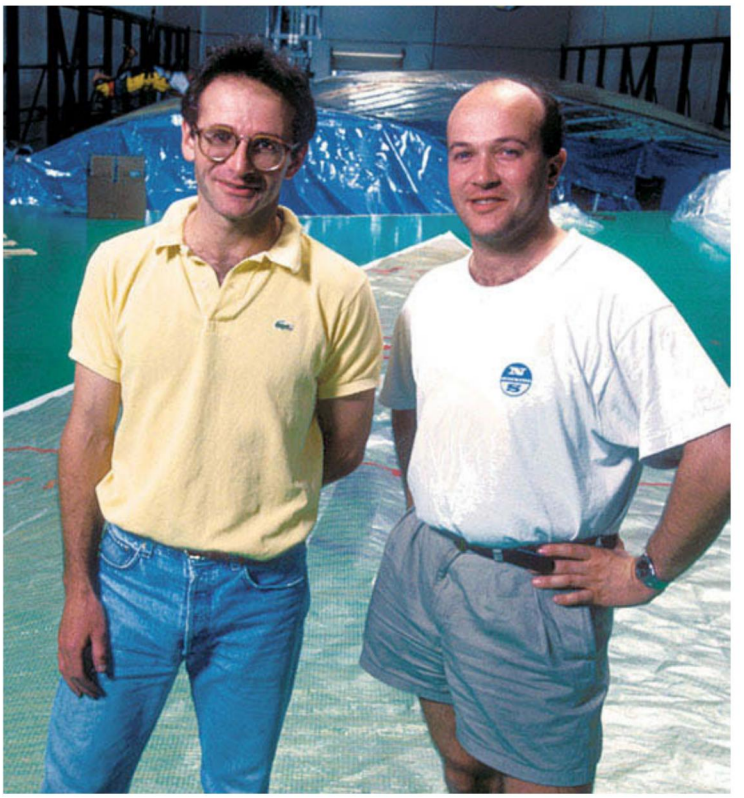
Ci-dessus, *Bella Mente*, un Maxi 72, propriété de Hap Fauth, dans la Maxi Yacht Rolex Cup en 2013, équipé de voiles North 3Di. (Photo Rolex/Carlo Borlenghi.)

En face, *Rambler 88* au départ de la course transatlantique 2015. Le bateau muni de voiles 3Di est skippé par son propriétaire George David. La quille est basculée au vent pour ajouter plus de moment de redressement. Moins les voiles se déforment et moins elles se creusent, moins la chute se ferme et moins la force de gîte est importante. (Photo Daniel Forster.)

Les deux hommes passaient leurs journées à l'abri des regards indiscrets, enfermés dans un local isolé des bureaux austères de la voilerie North Sails, située à Milford dans le Connecticut. Suspendus à un harnais de deltaplane au-dessus d'un moule en bois, telles deux araignées géantes, ils travaillaient à la fabrication d'une voile d'avant moulée de J24. Baudet et Dubois appliquaient des fils de Kevlar sous tension à une feuille de film de Mylar drapée sur un moule 3D. Le moule mâle avait la forme d'une aile. Il n'était pas plat comme le plancher auquel les maîtres-voiliers étaient si coutumiers. L'idée était de mouler cette voile en une seule pièce, et non plus en plusieurs morceaux comme une voile à panneaux – la méthode traditionnelle de pinces qui a dominé la voilerie pendant au moins cinquante ans – et de lui conférer une mise en forme 3D sur toute sa surface.

Lors de cette première tentative, Dubois et Baudet agençaient minutieusement les 4 500 mètres de fils d'un Kevlar onéreux de manière à répondre aux sollicitations sur la voile selon une approche empirique. Ils tentaient de déposer les fils avec une tension constante pour stabiliser la forme. Cet exercice s'apparentait à l'accordage d'une harpe, mais une harpe à mille cordes, tout en étant suspendus à un harnais. Ensuite, ils drapaient un deuxième film de Mylar sur le dessus pour refermer le sandwich. Ils activaient la colle au moyen d'un fer à repasser de ménagère ; et, à l'aide d'un rouleau à pâtisserie, ils pressaient les deux tranches de *pain* de Mylar sur la tranche de *jambon*, le précieux Kevlar. La confection en sandwich relevait plus de la construction navale que de la fabrication de voile.

L'idée de voile moulée en une seule pièce avait germé dans l'esprit de Baudet au moment de ses 17 ans en 1982. Alors apprenti dans un chantier naval, dans sa Suisse natale, il avait sollicité l'aide de son ami et compagnon de navigation, Luc Dubois, pour mettre au point son concept de voile moulée. L'approche de Baudet était tellement différente et impromptue que seul le noyau dur de North Sails, composé de Tom Whidden, Jay Hansen, Terry Kohler et David Hirsch, y plaçait quelques espoirs. Peu de personnes étaient dans la confidence. Lorsque le prototype a été testé pour la première fois lors d'une journée ventée sur un voilier *Evelyn* Hansen 32, les directeurs étaient enthousiasmés par la création des deux compères, en dépit de quelques problèmes évidents. Ils ont baptisé la voile 3DL en raison de sa conception laminée en trois dimensions. Au cours de ce premier test, la voile était étonnamment stable. Démunie de coutures de mise en forme, elle était lisse comme un miroir et 15 pour cent plus légère qu'un génois conventionnel équivalent. Le petit comité sentait qu'il tenait entre ses mains quelque



J.-P. Baudet, à droite, et Luc Dubois en 1992, affairés à leur projet 3DL. La méthode 3DL permet de fabriquer des voiles en une seule pièce, sur un grand moule articulé et reconfigurable. (Photo North Sails, LLC.)

chose de spécial, qui allait marquer un tournant dans l'histoire de l'industrie. Une ère nouvelle s'annonçait.

Petit récapitulatif des matériaux et procédés

Toutes les fibres utilisées, aujourd'hui, en voilerie existent depuis plus de trente ans, et certaines depuis plus de cinquante ans. Revenons brièvement sur les matériaux cités dans le chapitre 2, et rappelons quelques dates clés qui ont marqué l'introduction des fibres synthétiques dans l'industrie, toutes activités confondues, y compris la voilerie :

- Polyester (Dacron) : 1945
- Carbone : 1960
- Aramide (Kevlar, Technora) : 1970
- UHMWPE (Spectra, Dyneema) : 1980
- PBO : fin 1980
- Vectran : 1990

Le délai de conception d'une nouvelle fibre jusqu'à sa commercialisation peut prendre plus de dix ans. Certaines fibres ne sont jamais sorties des laboratoires[1]. Preuve en est avec la fibre M5 de DuPont, brevetée au début des années quatre-vingt-dix et médiatisée à plusieurs reprises, mais qui n'a jamais été commercialisée. La principale difficulté était probablement la même que pour le PBO : l'incapacité à complètement nettoyer la fibre filée d'un solvant résiduel en fin de processus, créant ainsi un matériau instable dont la qualité pouvait fluctuer. Dans le cas du PBO, c'était surtout son extrême sensibilité aux rayons UV qui le rendait inutilisable.

Quand une nouvelle fibre arrive sur le marché, ses chances de révolutionner le marché ne sont pas garanties. Par exemple, l'UHMWPE, un polyéthylène à très haute masse moléculaire, alors largement utilisé dans la voilerie en général, a eu très peu d'impact dans la voile de haut niveau jusqu'à récemment, comme nous l'examinerons plus loin dans ce chapitre. En 1998, North Sails a été la première entreprise à adopter le PBO (sa marque commerciale est Zylon), et également la première à l'abandonner peu après. C'était une bénédiction fortuite, car ce matériau instable aux éléments extérieurs a causé bien des déboires à de nombreux marins professionnels et a mis à mal l'industrie balistique. Il semble aujourd'hui avoir trouvé une meilleure utilisation en voilerie dans le gréement courant et les câbles anti-torsion pour enrouleurs.

Le Vectran, fibre de choix pour les applications textiles dans l'industrie aérospatiale, n'a pas non plus suscité de grand intérêt en voilerie en raison de son module relativement faible (rappelons qu'un faible module signifie une faible résistance à l'allongement). Ainsi, les progrès timides dans l'industrie des fibres de tissus à voile ont encouragé récemment les voileries à porter leur attention sur le processus de fabrication : la manière dont une fibre est utilisée dans la construction d'une voile.

Après le passage des voiles tissées aux voiles laminées, le 3DL a révolutionné le monde de la voilerie au moment de son invention[2]. De ce processus innovant est née une voile de module plus élevé, plus performante à tous points de vue et plus solide à poids équivalent que ses prédécesseurs. Comme c'est souvent le cas dans une révolution technologique, le changement s'accompagne d'une ou entraîne une nouvelle approche dans le milieu. Cette évolution de l'assemblage de laizes (pinces) à la structure monolithique s'est opérée de

1 Dates d'introduction de ces matériaux sur le marché et non dans la voilerie, c'est pourquoi les dates diffèrent légèrement de celles du chapitre 2.

2 Un matériau laminé est un matériau que l'on recouvre d'un film.

manière radicale, et non pas par étapes successives. Le passage du modèle textile ancestral à la modernité du processus de lamination était un véritable bond en avant.

Désormais, en choisissant soigneusement la composition de la membrane, les maîtres-voiliers peuvent contrôler de manière précise les propriétés mécaniques du produit final. Ces membranes 3DL ont une structure monolithique. Les voiles sont fabriquées d'un seul bloc sur de grands moules mâles articulés et déformables. Elles sont construites en 3D à l'aide de courbes complexes (courbure de Gauss : produit de courbures principales). La fibre est déposée d'un coin à l'autre, sans coutures ou raccords. Le tissu et la voile sont fabriqués simultanément et sont donc indissociables. De cette façon, même s'il est encore laminé sur un substrat de film, le produit final devient un matériau composite, c'est-à-dire formé de plusieurs substances.

Naissance d'un fabricant de voiles ingénieux

J.-P. Baudet, le créateur du 3DL, est originaire de Lausanne, en Suisse, siège du Comité International Olympique et de son remarquable Musée Olympique. Toute personne grandissant dans cette région ne pourrait rester indifférente au sport. En été, la ville de Lausanne, située au bord du lac Léman, est un haut lieu de la voile tout comme le sont San Francisco en Californie, Newport à Rhode Island (États-Unis) ou Sydney en Australie. Difficile alors pour un natif de rester insensible à cette activité nautique. Le grand-oncle et mentor de Baudet, Georges Perret, était ingénieur en mécanique. Il possédait un petit monocoque équipé d'un mât-aile et d'un safran équilibré, qu'il avait construit lui-même. « Oncle Georges n'achetait jamais du tout-fait, mais il fabriquait toujours tout lui-même », a confié Baudet. Sur ce bateau, Baudet a appris à naviguer et à tout faire lui-même aussi. À l'âge de 3 ans, il s'est coupé le doigt sur une machine à coudre alors qu'il tentait de fabriquer une voile. Cet incident a laissé de toute évidence une trace indélébile. Bien des années plus tard, son concept 3DL allait marginaliser la machine à coudre, l'outil principal et emblématique en voilerie.

Jeune apprenti à la voilerie Gautier, située sur le lac Léman, Baudet est encouragé à passer son diplôme de maître-voilier. Il n'existait pas de cours de voilerie en Suisse à l'époque, et il a donc suivi un cursus en construction navale. Rien d'étonnant à ce qu'il se soit mis, par la suite, à marier la fabrication de voile à la construction navale, essence même du 3DL. C'est dans la voilerie Gautier que Baudet a conçu sa première voile moulée avec Luc Dubois qui préparaît cette même année les Jeux olympiques de Long Beach, en Californie, et représentait la Suisse en 470. « Luc avait vu l'équipe de voile italienne équipée d'un foc North LeechCut », une voile dont les laizes et les pinces étaient verticales, a raconté Baudet. « Elle avait été conçue, je crois, par Guido Cavalazzi de North Sails Italie. Luc était impressionné par l'aspect lisse et régulier de cette voile à coupe verticale par rapport à une voile crosscut. Il ne voulait pas acheter ce modèle de foc, il voulait en fabriquer un lui-même. Cependant, sa mise en forme verticale rendait l'élaboration des pinces quasi impossible. Il fallait donc avoir recours à la puissance de calcul informatique. Nous avons alors suspendu à l'horizontale un foc crosscut que nous savions rapide. Cette voile s'est transformée en un moule, un moule femelle que nous avons recouvert de panneaux verticaux pour déterminer les pinces. » Dubois a utilisé la voile qu'ils avaient faite pour la Semaine de Kiel, en Allemagne, une épreuve phare pour la préparation aux Jeux olympiques, et a remporté la première course. « Cette voile était rapide ! » s'est souvenu Baudet. Mais le diable était dans les détails.

Dès le début, Baudet et Dubois savaient que le 3DL allait être très coûteux à développer. Les nouveaux paradigmes le sont généralement. Les dirigeants de North Sails se sont demandé si le 3DL était économiquement viable. Était-il concevable ? Est-ce que les voiles pouvaient être effectivement moulées sur un moule 3D ? North a donc consulté ses experts en tissus qui s'accordaient à dire que ce concept était réalisable, mais pas viable financièrement. Néanmoins, l'entreprise a décidé de se lancer dans l'aventure, un pari jamais osé dans la voilerie jusque-là. Une affirmation quelque peu prétentieuse et pourtant véridique. En tant qu'industrie, la voilerie est un trop petit marché pour financer des travaux d'envergure en recherche et développement. Le secteur est trop préoccupé par le présent pour penser à l'avenir.

Les voiles 3DL sont fabriquées à partir d'un moule 3D situé à l'usine de Minden dans le Nevada. C'est le Mylar qui confère un aspect brillant à la voile 3DL. Ce matériau disparaîtra avec le 3Di. La personne dans le harnais vérifie que la tête du robot dépose les fils correctement. Elle s'assure également que les fils adhèrent bien au film lorsque la tête fait demi-tour. (Photo Sharon Green/North Sails, LLC.)

Cette première voile 3DL construite dans le Connecticut avait été jugée réussie, du moins suffisamment pour une première tentative. La mission suivante dont Baudet était investi l'enthousiasmait : fabriquer un foc 3DL pour le syndicat de Dennis Conner en lice pour la prochaine Coupe de l'America qui allait avoir lieu à San Diego en janvier 1992, c'est-à-dire six mois après[3]. Pour Baudet, c'était comme passer de la fabrication d'une remise à la construction d'un gratte-ciel en l'espace de six mois.

Baudet et Dubois, avec l'assistance de l'ingénieur Bill Slyne, ont alors établi un atelier à San Leandro en Californie, aux abords de San Francisco. Slyne a conçu un Traceur/Cutter M90, une machine de découpe de tissus essentielle dans le procédé de fabrication. Il a également créé un processus de rotomoulage pour North Sails. Les hommes travaillaient dans une usine en location d'une superficie de 1 053 m^2, située à l'est de la baie de San Francisco. « À l'époque, nous n'avions jamais réussi le procédé de lamination. Nous ne savions pas comment disposer les fils en trois dimensions, et il ne nous restait que six mois avant la Coupe de l'America. Nous étions cependant motivés », a déclaré Baudet. Bill Slyne a élucidé la dépose des fils à l'aide d'un portique plutôt qu'avec l'intervention d'« hommes-araignées ». Ce portique ou pont roulant à commande numérique (CNC) pouvait se déplacer le long de trois axes linéaires – deux axes horizontaux (x et y) et un axe vertical (z) – ainsi que sur trois axes rotatifs (u, v, w) pour un total de six axes, ou six mouvements. Cela permettait de travailler dans toutes les directions en 3D. Slyne a également travaillé sur le logiciel de pilotage du pont roulant et de mise en forme du moule.

Un problème subsistait pourtant : le portique avait besoin d'un repère pour se situer dans l'espace en 3D. Slyne, avec l'assistance de Michael Richelsen, a configuré le système pour interfacer le pont roulant et le moule directement au logiciel de voile de conception de North. De cette façon, les dessinateurs pouvaient envoyer numériquement leurs maquettes de voiles, et ce, depuis n'importe où dans le monde. Puis le moule était mis en forme sur place grâce au système de pilotage du portique. Le premier moule mesurait 37 x 13,7 mètres, assez grand pour mouler une grand-voile de la Coupe de l'America.

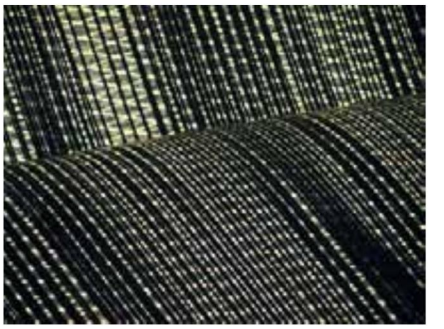
Pour construire le moule, ils ont utilisé du bois provenant de Home Depot (grand magasin de bricolage aux États-Unis), des poutres en plastique, des vis à cloisons sèches et des perceuses électriques. Ce bricolage ingénieux était digne des inventions excentriques du dessinateur américain Rube Goldberg. Seulement, la surface du moule préoccupait Baudet qui n'était pas ingénieur de formation, mais qui avait l'esprit très inventif. Un jour, alors qu'il se trouvait dans un aéroport, un carrousel à bagages a retenu toute son attention. Celui-ci était à la fois rigide et capable de suivre des courbes complexes. Une idée lui a alors traversé l'esprit : la surface du moule devrait avoir la structure d'un carrousel à bagages qu'il percevait comme les écailles d'un poisson. Pour façonner le moule, l'équipe de Baudet a utilisé des triangles connectés à des lattes qui recouvraient le moule. Si on écartait les triangles, les lattes se courbaient moins, et vice versa. Les triangles étaient à leur tour connectés à des vis sans fin et reliés à des moteurs électriques. « Nous devions réaliser cette expérience à moindre coût, parce que, si cela ne fonctionnait pas, on aurait épuisé notre budget », a relaté Baudet.

À l'approche de la Coupe, l'équipe ne semblait toujours pas en mesure de laminer une voile 3DL correctement. Le pont roulant, qui ne pouvait alors poser qu'un fil à la fois, perdait sans cesse sa position. Et, sans vouloir contrarier Mark Twain pour qui « l'hiver le plus froid

3 Le nom 3DL – Lamination en trois dimensions – n'était pas initialement destiné à être le nom du produit. C'était le terme technique utilisé depuis le début par North et ses partenaires Baudet et Dubois. Cette appellation a finalement été conservée.

qu'il ait jamais passé était l'été à San Francisco », l'humidité et la chaleur étaient si élevées qu'on avait l'impression d'être « dans un marécage », a déclaré Baudet. Il fallait 48 heures pour poser les fils d'une voile d'avant 3DL pour le défi *Stars & Stripes* de Dennis Conner. Pour chauffer le tissu laminé, après la pose de fils, l'équipe avait acheté dix fers à repasser dans un magasin de bricolage et les avait accrochés le long d'un grand morceau de bois. Un des hommes était suspendu au portique et faisait des allers et retours au-dessus de la voile, tout en essayant d'éviter d'emmêler les dix cordons auxquels les fers à repasser étaient fixés et d'empêcher la voile ou lui-même de prendre feu. Il aura fallu 12 heures supplémentaires pour chauffer la voile de cette façon. C'était comme repasser un champ de maïs.

Le premier foc 3DL pour *Stars & Stripes* se délaminait littéralement lors du premier hissage[4]. En fait, ils n'étaient même pas sûrs qu'il avait été laminé ! Tout cela dans le contexte de l'épreuve la plus exigeante du monde de la voile. Un deuxième foc 3DL avait pu être hissé pendant dix minutes lors des qualifications de la Coupe de l'America. Mais il fallait l'affaler dès que le vent montait. Pourtant, pendant ces quelques minutes, Tom Whidden, le président de North Technology Group (et coauteur de ce livre), alors tacticien à bord de *Stars & Stripes*, avait décelé des atouts prometteurs. Lors de cette même épreuve, l'équipe néo-zélandaise était également munie d'un foc 3DL. À l'issue de la Coupe de l'America de 1992, North Sails a apporté de nombreuses améliorations au pont roulant, aux processus de moulage et de lamination, au logiciel de découpe ainsi qu'à tous les autres domaines de production.



Gros plan sur une voile 3DL de la série 900, construite uniquement avec des fils très haut module, disposés dans le sens des contraintes dans la voile. Cette gamme était utilisée principalement dans la coupe de l'America de 2007. Par ailleurs les voiles de série 3DL 800 – également en carbone, mais de module plus faible, et par conséquent plus solide – étaient les voiles 3DL haut de gamme les plus vendues.

3DL : Élargir son échantillonnage de test

Le temps était alors venu de tester le nouveau processus 3DL à plus grande échelle. L'occasion s'était présentée quelques semaines plus tard, en janvier 1994, durant la semaine de la Key West Race (course sponsorisée par le magazine *Yachting*), et à la suite de la Conférence Southern Ocean Racing (SORC). Par le biais du bouche à oreille, une vingtaine de voiles 3DL ont été produites et vendues à divers bateaux de 30 à 50 pieds, y compris des J44, participant à la Key West. Jay Hansen de North Sails, responsable du développement des voiles 3DL à l'époque, participait à la régate sur un J44. Il s'est rapidement aperçu que son génois #1 en 3DL se délaminait, mais qu'il était aussi très rapide (son propriétaire a d'ailleurs remporté l'épreuve dans la classe J44 avec cette voile). Craignant que toutes les autres voiles 3DL ne se délaminent, Hansen a contacté chaque propriétaire pour leur expliquer deux prédictions et un fait. La première : les voiles 3DL allaient se délaminer. La deuxième : elles resteraient malgré tout encore très rapides. Et North Sails remplacerait alors les voiles pour la prochaine saison de course au printemps, a-t-il expliqué.

Les trois événements se sont déroulés comme prévu. Quelque temps après, durant l'été, lors d'une régate à Detroit, Hansen a approché l'un des navigants de la Key West pour lui demander comment était la nouvelle voile 3DL. « Je ne sais pas, a déclaré le propriétaire, la voile délaminée est encore rapide ! » Le magazine *Yachting* était intrigué. Un article était paru dans le numéro d'avril 1994 avec ce chapeau : « Sept bateaux participant à la régate de *Yachting*... étaient équipés de voiles issues de la nouvelle technologie 3DL de North [Processus]. Deux bateaux ont remporté leurs classes, et un seul s'est classé au-delà de la quatrième place. Le mérite de ces résultats revenait plus aux bateaux et à leurs équipages qu'aux contributions d'une seule voile. Mais on ne pouvait pas nier le fait qu'ils avaient en commun une voile 3DL. »

Les années suivantes ont confirmé la supériorité du 3DL. Le numéro de mai 1994 du magazine *Yachting* contenait son tableau d'honneur annuel. Le procédé de fabrication 3DL de North a été qualifié d'« innovation la plus significative en termes de design dans la catégorie voile ». On pouvait lire dans les pages du magazine : « Le procédé 3DL consiste en une voile plus légère, plus fidèle à sa forme dessinée, plus solide à poids équivalent, et dotée d'une plage d'utilisation plus large. »

---

4 Naturellement, la nouvelle de ce problème de délamination prématurée s'est rapidement propagée, et les compétiteurs de North ont détourné l'acronyme 3DL en « Three Days Long » (d'une durée de vie de trois jours).

Mari Cha IV dans la Rolex Transatlantique en 2005. Le voilier de 140 pieds (42,6 mètres), doté de voiles 3DL en carbone, a établi un record de traversée transatlantique pour un monocoque en 6 jours et 17 heures, pulvérisant de 2 jours le record datant de 100 ans de cette célèbre Transatlantique. *Mari Cha IV* a également établi un record de voile de 526,7 milles nautiques sur 24 heures. (Photo Carlo Borlenghi/Rolex.)

Lors de la coupe de l'America de 1995, les voiles North Sails 3DL ont été, une fois encore, associées au succès de l'équipe néo-zélandaise avec son *Black Magic*. Son barreur, Russell Coutts, était en passe de gagner cette compétition et de devenir célèbre. Après leur victoire, Coutts a confié : « Nous avons navigué plus longtemps avec nos voiles 3DL que les autres, et je crois que cela nous a permis d'avoir un avantage en vitesse. Dès leur première mise à poste, les voiles étaient rapides et possédaient une incroyable plage d'utilisation. Les voiles 3DL sont une bénédiction pour tous les voiliers des quatre coins du globe parce que, dorénavant, ils peuvent réduire le nombre de voiles dans leur inventaire. » Il n'y a pas d'épreuve plus exigeante que la Whitbread/Volvo Ocean Race. Les voiles 3DL ont dominé cette course en équipage autour du monde depuis l'édition 1997-1998 jusqu'en 2010 avec l'avènement du 3Di. Depuis, le 3Di a régné sans partage sur cette compétition.

Spécificités des voiles moulées

Tous les compétiteurs de North ont des voiles à membrane (fils encapsulés par des films de Mylar) qui se ressemblent. Mis à part des différences de design, de qualité et de détail, les copies de 3DL sont conçues en deux dimensions (2D). Autrement dit, elles sont mises en forme horizontalement (pinces) tout comme l'étaient toutes les voiles avant le 3DL. Une voile à panneaux est fabriquée en plusieurs morceaux. Certaines copies 2D des voiles 3DL de North sont fabriquées d'un seul tenant, coupées en sections puis mises en forme. Ces voiles à panneaux ne permettent une courbure que dans une seule direction. De plus près, cette voile membrane 2D à panneaux apparaît comme une succession de sections planes. À l'exception du rond de guindant, la mise en forme ne se produit que le long de la ligne de pinces. En fonction de l'élasticité du matériau, le régleur de voiles peut le remarquer ou pas. Cependant, l'écoulement de l'air perçoit chaque surface inégale de la voile. Le moulage en 3D des voiles permet une courbure lisse dans toutes les directions

Les arguments aérodynamiques et structurels du 3DL

De nombreux facteurs contribuent à la supériorité des voiles 3DL sur les voiles à panneaux ou leurs copies 2D. Dans une voile à panneaux ou une voile membrane 2D, chaque fil structurel de la structure (du point de drisse jusqu'au point d'écoute) est interrompu à chaque raccord ou couture. C'est plat, puis courbe, puis plat et courbe de nouveau, et ainsi de suite. Ces fils sont donc soumis à des contraintes plus élevées au niveau des points d'inflexion. On appelle ces points concentrateurs de contraintes. Les ingénieurs les évitent à tout prix. Étant fortement sollicitées, ces zones s'allongent davantage. Peu importe si une voile est crosscut ou tri-radiale, les charges entre le point de drisse et le point d'écoute ne peuvent être distribuées uniformément par des sections assemblées sur la voile.

Comme pour un conduit d'aération en aluminium, la seule façon pour la voile de prendre une forme lisse en 3D avec une courbure dans les deux sens est que le tissu se déforme ou s'allonge. Dans une voile, cette déformation est subtile, surtout quand on a recours à un grand nombre de panneaux et de coutures. Mais elle est bien présente. Cette déformation et la charge inégale des fils structurels sont les inconvénients inhérents aux voiles à panneaux. Contrairement à une voile fabriquée en 2D, chaque fil dans une voile 3DL est posé en continu d'un coin à l'autre, selon une courbe régulière 3D semblable à celle que ce fil suivra lorsque la voile sera réglée sur le gréement et mise en tension par le vent. Ainsi, chaque fil dans une voile 3DL absorbe uniformément la charge sur toute sa longueur. Le résultat est un allongement réduit pour une densité de fil, un poids et une résistance donnés.

Le principal facteur qui explique le succès du 3DL face à la concurrence dans le segment le plus exigeant du marché était (et est toujours) la mise en forme en 3D. C'est l'une des raisons majeures, comme nous le verrons, pour lesquelles le 3Di était une évolution logique. Une gamme sans cesse croissante de moules (près d'une douzaine) ainsi que des progrès technologiques ont porté les voiles 3DL bien au-delà de leurs modestes premiers pas.

La deuxième génération « NT » (nouvelle technologie) de moules utilise des systèmes sophistiqués à commande numérique programmable (Siemens 357 12-axis CNC) qui ont pour objectif d'augmenter la précision nécessaire à la mise en forme d'un moule spécifié par le dessinateur tout en réduisant le temps requis pour cette opération. Les développements de surface de moule comprennent un système de lattes avec une multitude de barres de contrôle, qui apporte aux moules une plus grande flexibilité et permet ainsi de reproduire les courbures extrêmes exigées par les dessinateurs. La clé pour assurer la précision est la capacité de positionner les barres avec exactitude et à la bonne hauteur, c'est-à-dire dans la position en Z correcte au-dessus du plancher. Une raison est que la tête de dépose, suspendue au pont roulant, doit toucher la surface du moule avec la même pression chaque fois qu'elle pose les fils pour les voiles 3DL. En outre, c'est la forme du moule qui détermine la forme de la voile et sa régularité. La précision au millimètre est nécessaire, un exercice loin d'être trivial. Réussir à obtenir la position en Z désirée a nécessité beaucoup d'expérimentations. À un moment, North a utilisé des lasers jumelés montés sur le portique aérien, qui détectaient la surface du moule dans l'espace et ajustaient automatiquement la forme du moule à celle escomptée. Le logiciel qui pilotait le laser permettait de superposer et comparer les surfaces issues des fichiers de conception avec celles des moules physiques. Ce nouveau système était nettement plus rapide que la méthode initiale et semblait convaincant. Pourtant, il n'a jamais donné entière satisfaction. Des reflets provenant des moules perturbaient le fonctionnement optimal des lasers.

La notion de « répétabilité » a été un facteur dominant au sein de l'entreprise North Sails depuis l'époque de Lowell North à aujourd'hui. C'est également un aspect exigé par les clients, en particulier pour les régatiers de haut vol qui désirent une fidèle réplique de la voile précédente. Les régleurs de voiles talentueux peuvent déceler la différence entre les deux voiles. En voilerie, la technologie de pointe n'est synonyme de progrès que si elle permet de reproduire avec exactitude le même dessin de voile autant de fois que l'on souhaite. Si l'on ne peut dupliquer une voile, on ne pourra pas l'améliorer. Chaque voile devient alors potentiellement une inconnue.

L'étape suivante dans la quête de précision consistait à placer un palpeur numérique sur la surface théorique où le moule était supposé se trouver. Si besoin, le moule était

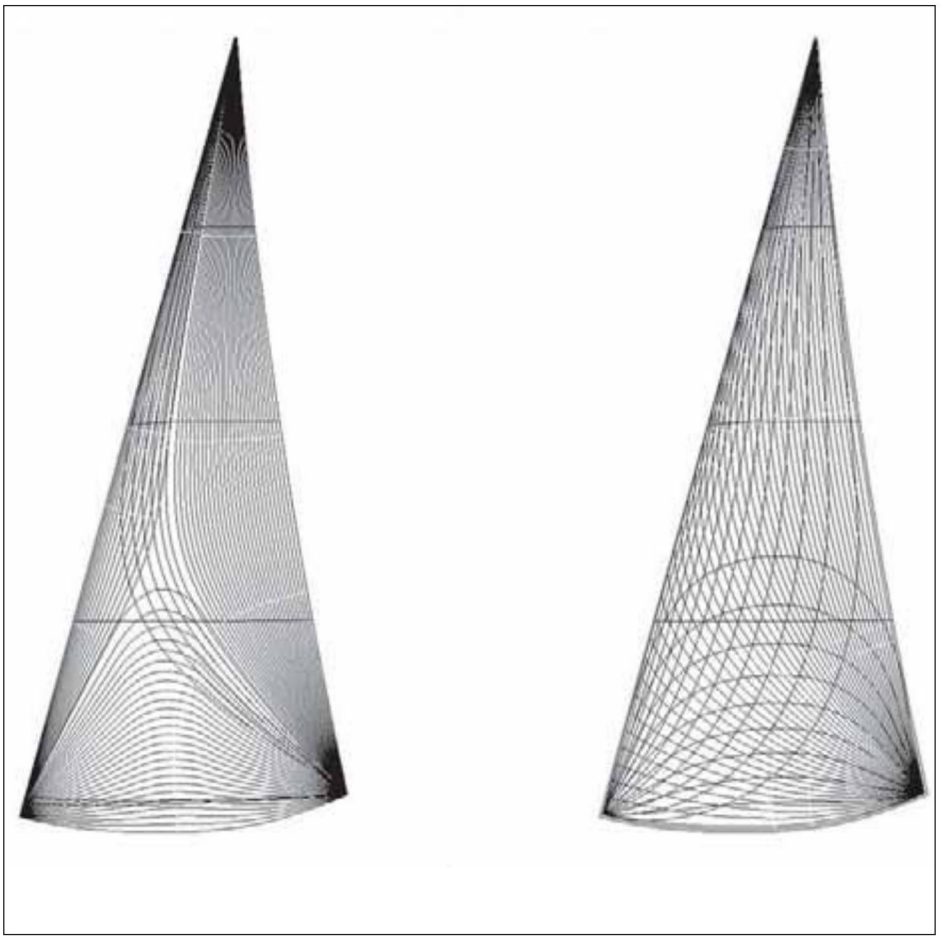


Fig 5.1. L'illustration à gauche montre une structure 3DL « Grand Prix » de compétition, à ses débuts en 1997. La figure à droite représente une structure 3DL « Race » de 2015. Comparez les deux schémas et notez l'absence relative de fils dans la zone du milieu avant du foc sur la gauche, et particulièrement la quantité moindre de fils croisés. La structure nettement plus élaborée et plus récente a permis d'obtenir une déformation très homogène, éliminant les distorsions. Ce progrès dans la structure a amené les dessinateurs de North à modifier de façon significative leurs dessins de voiles. Le même dessin pour une structure moderne aurait abouti à une voile beaucoup plus plate pour des conditions de vent données, car cette voile serait beaucoup moins élastique dans son ensemble.

ensuite ajusté pour coïncider avec ce point. Un système simple qui a bien fonctionné pendant longtemps. Cependant, il y a quelques années, Dave Hueftle et Gabe Testa, deux jeunes développeurs à North, ont créé une nouvelle interface graphique. Par itération avec le logiciel d'ajustement de moule, ce programme permet aujourd'hui de contrôler le moule au millimètre près en plusieurs milliers de points. Comme la loi de Moore s'avère toujours fondée, la magie de l'évolution de la puissance des ordinateurs s'applique dans ce cas[5]. De tels logiciels étaient inenvisageables il y a dix ans, et l'étaient encore moins au moment de l'apparition du 3DL au début des années quatre-vingt-dix.

Le deuxième facteur clé du succès du 3DL, et depuis du 3Di, était nettement moins subtil, même s'il s'applique à la production de n'importe quel produit de haute qualité. C'est la minutie. Comme tout maître-voilier vous le dira, il y a une multitude de façons de rater une voile. Les moindres failles dans le contrôle de processus, l'inconstance de la qualité des matières premières et l'inattention aux détails mènent tout droit à l'échec. La seule solution est l'élaboration d'un programme de perfectionnement permanent.

Au-delà du développement d'une technique précise de mise en forme de moule et d'un processus de fabrication discipliné et rigoureux, le troisième enseignement tiré de l'expérience des années 3DL était la compréhension de la structure elle-même : où et comment disposer les fils structurels sur le 3DL pour utiliser au mieux leurs propriétés. La même logique s'applique aux filaments du 3Di. Un bref coup d'œil en arrière sur l'agencement des fils de 1997 à aujourd'hui illustre les progrès accomplis (comparer les deux illustrations de la figure 5.1). Le développement et le rôle des logiciels d'analyse ont été essentiels dans cette évolution. Il est probable que si le concept de 3Di avait précédé le 3DL, North n'aurait pas joui du succès que l'entreprise connaît aujourd'hui. Telle la machine volante de Léonard de Vinci, le 3Di aurait été une de ces idées ingénieuses arrivées trop tôt. Même si North Sails s'est imposé sur le marché de la voile haute performance (croisière et course) avec ses produits 3DL, la voie était toute tracée pour le 3Di, à l'insu de tous y compris des employés de North !

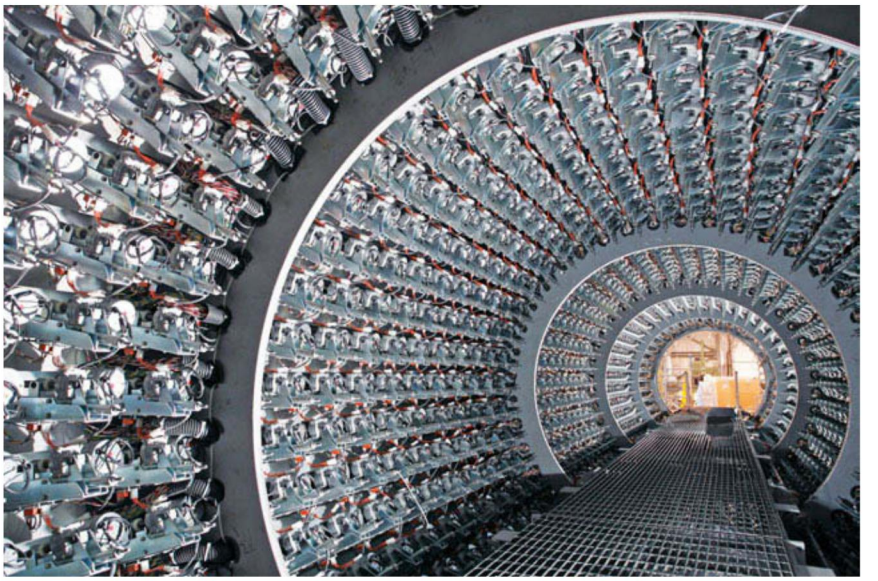
Qui ne risque rien n'a rien

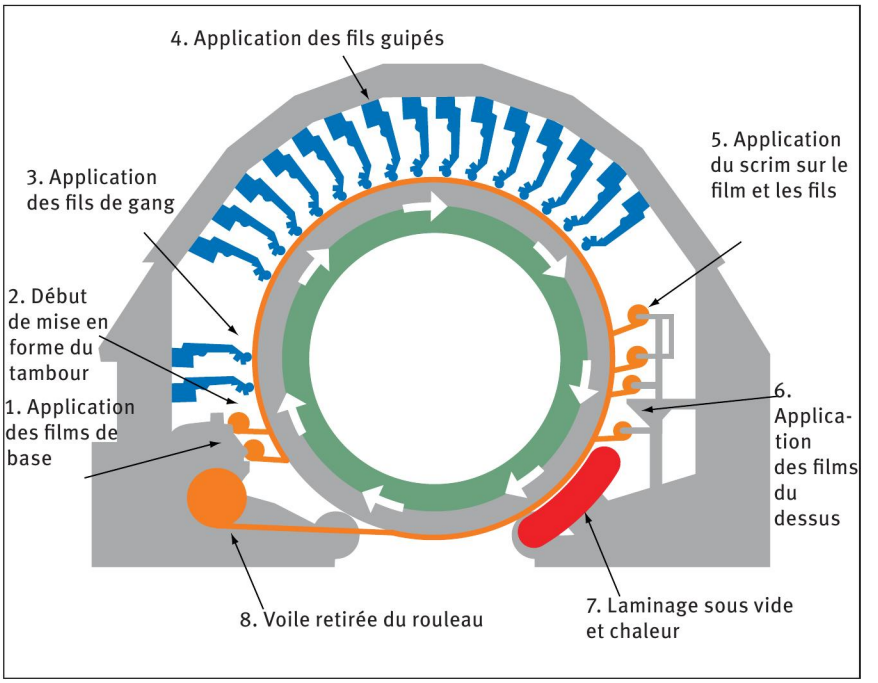
Au cours de l'évolution du 3DL au 3Di, un autre projet technologique très ambitieux a vu le jour : le 3Dr (r signifiant rotomoulage). Conçu en 1998, le concept visait à fabriquer une peau 3DL, une voile vierge sans les finitions, en une seule opération par opposition au procédé par étape du 3DL ou de toute autre voile. Ce projet était une idée originale de Bill Slyne, l'ingénieur qui a assisté au développement du 3DL dans ses débuts. Certes, le procédé 3DL était plutôt efficient pour les grandes voiles, mais son prix de revient était trop important pour les propriétaires de petits bateaux. Le 3Dr promettait alors des gains de temps en production et un coût de main-d'œuvre réduit.

5 Loi de Moore : le nombre de transistors dans un circuit intégré complexe double approximativement tous les deux ans. (source Wikipédia.)

Le génie du 3Dr consistait à utiliser un tambour de 12 mètres de diamètre et 10 mètres de long sur lequel toutes les étapes du procédé étaient accomplies en parallèle. On procédait d'abord à l'étalement du film plastique sur un croissant du tambour. Puis on déposait les fils sur ce film par le biais de plusieurs têtes qui se déplaçaient au-dessus du tambour en rotation. Ensuite, une autre couche de film venait compléter le sandwich, et enfin, le tout était laminé dans un four à infrarouge. En quelques minutes, la machine produisait une membrane de voile et pouvait en fabriquer jusqu'à une centaine (voir photo ci-contre et fig. 5.2).

Certaines de ces voiles étaient plus ou moins satisfaisantes et ont dû être remplacées[6]. Néanmoins, on constatait des progrès jusqu'à ce qu'un incendie accidentel dans l'usine North de Toronto (Canada) mette fin au projet. Entre-temps, North Sails avait établi une production du 3DL au Sri Lanka qui permettait de diminuer les coûts et facilitait ainsi l'accès du 3DL aux propriétaires de petits bateaux. Il n'était donc plus nécessaire de reconstruire le 3Dr. Finalement, ce concept expérimental aura coûté cher à l'entreprise, mais North Sails a complètement assumé son choix. Les dirigeants et les membres du conseil d'administration de la compagnie estimaient que si l'on n'essuyait pas quelques revers de temps en temps, c'était qu'on ne repoussait pas suffisamment ses limites.





Le 3Di : une technologie de pointe

Les deux révolutions majeures dans la voilerie moderne – 3DL et 3Di de North – sont nées dans le même canton de Vaud en Suisse. D'autres marins et entrepreneurs influents de l'industrie marine sont également originaires de Vaud, tels que Pierre Fehlmann (Whitbread Round the World Race) et Ernesto Bertarelli (Coupe de l'America). Ce décor local, dans une Suisse enclavée, est en soi une histoire à raconter.

C'est en 2001 que cette histoire commence avec Gérard Gautier et Edouard Kessi, deux marins suisses, entrepreneurs et fabricants de voiles à l'origine du 3Di. Gautier n'était autre que le mentor de J.-P. Baudet dans les années quatre-vingt. Il s'est ensuite associé à Kessi pour fonder la société Gautier Sails qui a finalement été vendue en 2001. Ils étaient également propriétaires d'une des premières et fructueuses entreprises de parapente. À la recherche de nouveaux défis, ils rêvaient de la prochaine avancée dans le secteur de la voilerie. Le 3DL était ce qui se faisait de mieux en termes de voile à l'époque. Mais les deux compères reconnaissaient également l'intérêt de l'utilisation de filaments individuels dans le concept du « Cuben Fiber ».

Figure 5.2. La photo et le schéma ci-dessus montrent une vue intérieure d'une machine 3Dr de rotomoulage de North (r signifie roto-moulage, c'est-à-dire moulage sur un tambour en rotation). Les 2 200 pistons contrôlés numériquement et rayonnant à partir de l'axe du cylindre forment le tambour. Deux voiles posées au-dessus ont été construites simultanément. L'ingéniosité de cette méthode était de fabriquer plusieurs voiles en même temps et en parallèle plutôt qu'en série. On peut observer ce flux de production sur l'image. Un incendie à Toronto a mis fin au projet. (Photo Michael Levitt.)

6 Le procédé 3Dr illustrait bien le vieux dicton sur la machine du futur qui impliquait un homme et un chien. « L'homme sera là pour nourrir le chien. Le chien sera là pour empêcher l'homme de toucher aux machines. » (Warren G. Bennis.)

Alinghi teste ses célèbres voiles noires « Amalgam » en 2006, précédant la 32e Coupe de l'America à Valence, en Espagne (en 2007). Les voiles sont composées de PBO, un fil plus ou moins discrédité en voilerie. Manifestement, ces voiles étaient de couleur noire afin de les protéger de la lumière, mais aussi, peut-être, pour qu'elles aient l'apparence du carbone. C'était une étape qui préfigurait le processus 3Di de North. Ces voiles ont été réalisées en 2D, et non en 3D, comme le sont le 3Di et le 3DL. North avait fourni des informations sur les pinces et le rond de guindant à *Alinghi* en échange d'un droit de préemption. Le reste appartient à l'Histoire. (Photo Daniel Forster.)

Le terme Cuben a été inventé par les journalistes en référence à l'exposant à la fin du nom de l'équipe *America*^{3}, le defender de la Coupe de l'America de 1992. Au cours de cet événement à San Diego, le voilier aurait utilisé des voiles fabriquées à partir de matériaux précurseurs du produit commercial actuellement disponible. Avant 2003, tous les tissus laminés modernes pour les voiles performance étaient composés de trois matériaux constitutifs : fibre, résine et film. Le maillon faible évident semblait être le film Mylar. Il ne contribuait pas suffisamment aux propriétés pour justifier son poids. Il servait en général de support, et, en termes de module et de ténacité, il n'apportait rien. Pourtant, les voileries avaient besoin d'un substrat sur lequel coller les fibres et empêcher que le vent ne souffle à travers la structure de fibre. Rappelons qu'un différentiel de pression est nécessaire pour créer de la portance, de même qu'une barrière pour protéger les fils du ragage.

L'idée de Gautier et Kessi était de fabriquer une membrane souple de la même manière que l'on conçoit un composite rigide : abandonner le Mylar et utiliser des bandes structurelles de filaments dans la voile aussi efficacement que possible. Ces bandes remplaceraient les fils utilisés jusqu'alors. La tâche des deux associés était de disposer la fibre localement là où elle était nécessaire sans avoir à aller d'un coin à l'autre de la voile comme dans le procédé classique des structures à membrane. La solution évidente était d'étaler les fils de fibre en bandes de filaments imprégnés. Le processus comme le produit ont été nommés « Amalgam ». Le mot vient de l'anglais *amalgamate* : combiner ou fusionner plusieurs entités en une seule (amalgamer en français).

Alinghi : l'étape évolutive

En 2003, un troisième partenaire avait rejoint l'entreprise naissante : François Mordasini, un homme d'affaires de métier et marin aguerri. Mordasini possédait un certain nombre de sociétés dont l'une était spécialisée dans l'importation de viande d'Argentine et dont le partenaire n'était autre qu'Ernesto Bertarelli. Ce dernier avait un intérêt pour la technologie en général, et en particulier pour la Coupe de l'America. À la fin de 2004, Mordasini a demandé à Bertarelli s'il souhaitait investir dans le projet Amalgam. L'équipe suisse de Bertarelli, *Alinghi*, dans la Coupe de l'America, a acquis les droits pour ce nouveau concept. En mars 2005, Grant Simmer, responsable de l'équipe navigante d'*Alinghi*, a mis Jay Hansen, alors vice-président du Groupe Marine de North, au courant de ces nouveaux développements. S'est ensuivie une période de discussions intenses entre le syndicat et la voilerie.

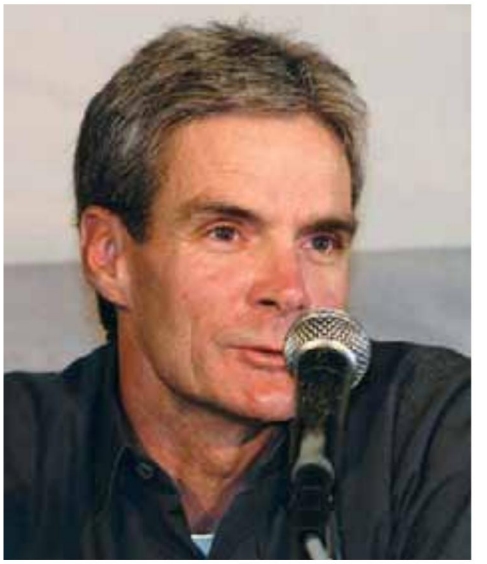
Le defender suisse était à cette époque en pleins préparatifs de la 32e Coupe de l'America qui allait se tenir en 2007 à Valence, en Espagne. *Alinghi*, comme tous les autres syndicats, à l'exception des Chinois, s'était engagé à acheter des voiles 3DL North pour l'événement. Parmi les membres du design team d'*Alinghi* figuraient certains talents de North : Michael Richelsen, directeur technique de North, Mike Schreiber, designer de voiles high-tech et vétéran de la Coupe de l'America, et Patrick Mazuay, jeune designer prometteur de North Sails Suisse. Également membre de l'équipe helvétique, Grant Simmer, navigateur sur *Australie II* (bateau testeur) en 1983, et qui avait été copropriétaire de North Sails Australie pendant quinze ans avant d'être embauché par le syndicat.

En automne 2005, il était clair que, malgré les promesses du projet Amalgam, l'équipe *Alinghi* avait besoin du savoir et des outils de conception de North Sails pour le mettre en œuvre. En échange de ces informations, et d'un prix vertigineux, *Alinghi* était prêt à accorder à North la préemption sur cette nouvelle technologie[7]. Au cours des mois suivants, Hansen et d'autres personnes du groupe North se sont rendus en Suisse sur les lieux de NSA, la société de gestion du projet Amalgam mise en place par *Alinghi*. Finalement, North a accepté de transmettre les données confidentielles sur le rond de guindant et les pinces à *Alinghi* en échange d'une option d'achat de NSA.

Pendant ce temps, un consensus a émergé au sein de North autour de l'idée qu'Amalgam pouvait être le prochain 3DL. Au cours de l'été 2006, ce nouveau concept a fait ses premières preuves à bord d'*Alinghi*. À ce stade, les fameuses voiles noires de l'équipe suisse étaient mises en forme à l'aide d'une presse ingénieuse. NSA a utilisé du PBO, le fil banni par toutes les voileries des années auparavant, mais celui-ci était imprégné de résine noire chargée de carbone pour le protéger de la lumière et pour le dissimuler des regards indiscrets. Cela contribuait à la couleur distinctive des voiles. Celles-ci étaient faites sur une surface plane plutôt que sur un moule, trait de fabrique du 3DL et du 3Dr, et par conséquent leur mise en forme nécessitait une technique d'assemblage 2D à base de pinces et de ronds de guindant. C'était la partie du processus qui n'impressionnait pas les quelques personnes de North au courant du projet. Pourtant, les progrès semblaient prometteurs.

Puis en janvier 2007, Hansen a reçu un autre appel téléphonique de Simmer : « Je veux que vous soyez le premier à savoir qu'aujourd'hui j'ai annoncé à l'équipe [*Alinghi*] que nous avons arrêté le projet NSA. » Simmer a ajouté qu'ils avaient fait beaucoup de progrès, malgré cela, les deux dernières voiles étaient catastrophiques, et ils semblaient faire un pas en avant, deux pas en arrière. L'équipe navigante en avait assez finalement. Ils ne pouvaient pas se permettre d'y consacrer autant de temps, car le temps est ce qu'il y a de plus précieux dans les campagnes de la Coupe de l'America. Cela aurait pu être la fin de l'aventure, mais l'équipe disposait encore d'une nouvelle voile en transit lorsqu'elle avait abandonné le projet. Une fois la voile terminée, l'équipage s'est dit qu'ils n'avaient rien à perdre et l'ont essayée. « C'était la meilleure voiles Amalgam jusqu'à présent », a raconté Hansen. L'un des principaux régleurs de voiles d'*Alinghi* a confié à Grant que cette voile était tout aussi performante que les voiles 3DL de North. Étant donné que le 3DL était alors le fruit de quatorze années de développement, cette amélioration était significative.

7 Au fil des ans, North a reçu des centaines de propositions sur de nouvelles idées de voiles. Certaines étaient intéressantes, d'autres invraisemblables, et la plupart n'étaient pas viables commercialement. Cependant, North a toujours été à l'écoute, ouverte à toutes possibilités.



Jay Hansen, à gauche, et Grant Simmer, à droite, représentent respectivement North Sails et *Alinghi*, au début des négociations sur le 3Di. (Pam Hansen, photo à gauche, Michael Levitt, photo à droite.)

La fin du projet pouvait être perçue comme un échec, mais North Sails a exercé son option d'achat 30 jours après la dernière course de la Coupe et a acquis la société NSA. Gautier, Mordasini et Kessi sont devenus partenaires de North afin d'assister l'équipe dans la commercialisation des produits[8]. Il ne faisait aucun doute que c'était l'investissement technologique le plus important en voilerie, même si North, avec sa part de marché dominante, ne manquait pas d'atouts. Le prix s'était négocié à 5,5 millions de dollars. Cette mise initiale était seulement le début d'un long voyage difficile et onéreux pour arriver au produit performant 3Di actuel qui domine la voile de compétition. Et pourtant, la route était marquée par la déception du 3Dr et par le succès du 3DL. Forte de son assise commerciale sur le segment de la course haut de gamme grâce à son produit phare (3DL), North n'avait, en effet, aucune raison d'emprunter un chemin à haut risque. Mais l'entreprise partait du principe qu'un jour un compétiteur inventerait un meilleur produit sur le marché. Alors, autant que North fît concurrence à son propre 3DL.

Un chemin semé d'embûches

La route n'était pas sans difficultés ni sans obstacles. Parmi les nombreux défis de North, le plus grand semblait être de reproduire la même mise en forme 3D des voiles que celle qui avait fait la réussite du 3DL. Au fil des années, d'importants investissements ont été réalisés pour améliorer la précision des 11 moules à Minden dans le Nevada. Et North savait que la mise en forme 3D était supérieure au 2D. Elle savait aussi que les films de Mylar utilisés dans le processus 3DL se conformaient au moule par thermoformage sans ondulations ou plis affreux. Mais qu'en était-il des bandes de filaments imprégnées d'adhésif ? Allaient-elles se comporter de la même manière ? Avant d'élucider ce problème, il fallait surmonter de nombreux autres défis. Le premier était de créer les bandes filamentaires. Pour expliquer ce point, il faut revenir à un élément formateur clé dans l'histoire du 3Di : le Cuben Fiber.

Le Cuben Fiber

Heiner Meldner, allemand d'origine (déjà évoqué dans le chapitre 1), a quitté son pays à l'âge de 30 ans pour enseigner la physique à l'Université de Californie à San Diego. Pilote de planeur de formation, il avait déjà 400 heures de vol à son actif à 17 ans. Il possédait aussi un Soling, quillard de sport, qu'il partageait avec deux autres professeurs de l'Université. Un jour, l'occasion de naviguer et de tester des focs avec Lowell North s'était présentée à lui. Meldner n'était pas tellement convaincu par le protocole basique. « Je pense que je peux faire ce test de voile analytiquement, ou sur l'ordinateur », a-t-il commenté à la fin de cette journée de navigation. « Si vous y arrivez, a déclaré North, vous nous rendrez probablement riches. » Meldner est parvenu à faire les tests sur ordinateur et à comparer les voiles analytiquement. Quant à devenir « riche », la notion était tout à fait relative.

Après un temps d'absence, Meldner a refait son apparition dans le monde de la voile lors de la Coupe de l'America de 1992 (alors régie par une nouvelle jauge : International America's Cup Class, IACC) durant laquelle il a travaillé pour *America*[3] de Bill Koch,

8 Comme ce fut le cas avec Jean-Pierre Baudet, Luc Dubois, et Pierre Fehlmann pour le 3DL, North s'est associé avec les membres d'Amalgam pour le 3Di.

l'équipe victorieuse, également appelée les « Cubens », un clin d'œil à l'exposant à la fin de leur nom. Meldner et R. J. Downs (son partenaire, ingénieur en composite) avaient produit un tissu de voile exclusif et breveté du nom de « Cuben Fiber ». C'était un mélange de carbone, de filaments de polymère, de film et d'adhésif. Après cette Coupe, ils ont fabriqué le tissu sous la marque America[3] Technologies, rebaptisée Cuben Fiber Corp. en 1997 afin de distribuer le tissu dans plusieurs secteurs, y compris la voilerie. North Sails comptait parmi ses clients. Même si certaines voiles North de près étaient composées de Cuben, avec l'avènement du 3DL, ce matériau était principalement utilisé pour les voiles de portant.

Le Cuben Fiber est unique à bien des égards. Meldner et Downs ont été les premiers en voilerie à mettre en œuvre le procédé d'étalement de fils en filaments bien que le processus ait été appliqué à d'autres industries, et également les premiers à utiliser du fluor-carbone (plus connu sous le nom de PVC) en tant que support pour les feuilles de filaments[9]. Les fluor-carbones sont moins sujets au rétrécissement et sont plus denses que le Mylar. Cependant, pour les plus faibles grammages, Meldner et Downs remplaçaient le film PVC par un film Mylar pour une question de poids (0,5 oz minimum pour le film PVC). La mise en œuvre du Cuben Fiber permet d'obtenir les matériaux laminés les plus légers de l'industrie. Les films sont clairement un élément majeur pour le Cuben Fiber, tout comme ils ont été une nécessité pour tous les autres laminés, y compris le 3DL, afin de protéger les fibres et d'éviter l'égalisation des pressions (en cas de porosité). Si l'on considère que les PVC tels que le Tedlar de DuPont coûtent environ 18 fois plus cher que le Mylar, on comprend mieux à quel point leur utilisation doit être cruciale. Pas étonnant que l'un des attraits significatifs du 3Di pour North était donc de ne pas avoir recours aux films !

Lorsque l'entreprise s'est lancée dans le 3Di, ses avocats ont jugé que le 3Di pouvait violer le brevet du Cuben Fiber. Accoutumée à la guerre des brevets, North Sails a approché Meldner et Downs pour discuter d'un contrat de licence[10]. Peu après, North achetait les droits exclusifs d'utilisation de produits Cuben Fiber en voilerie ainsi que les droits sur les brevets. Un autre aspect non négligeable dans l'acquisition du Cuben Fiber était la possibilité de travailler avec Meldner et Downs. « Des experts en science des matériaux », a précisé Hansen. La décision d'acquérir le Cuben Fiber a également soulevé une question épineuse : est-ce que North devait restreindre la vente de Cuben Fiber à ses propres planchers ou continuer à le vendre aux autres voileries, comme cela avait été le cas depuis la fin de la Coupe de l'America de 1992 ? L'entreprise a finalement opté pour la deuxième solution. North n'était pas insensible à son surnom de Big Blue, en référence à la domination d'IBM dans les années soixante-dix, et donc restreindre la distribution de Cuben Fiber aurait pu donner raison à cette image. North était de toute façon très confiante de ses capacités de conception.

L'aspect le plus significatif du Cuben Fiber par rapport au 3Di était son « procédé d'étalement filamentaire ». Les fabricants de tissus tels que DuPont ou Toray vendent de l'aramide (Kevlar) sous forme de fils ou filaments de carbone torsadés en faisceaux. Le processus Cuben Fiber, lui, détord la fibre et l'étale à nouveau sous forme de filaments. Cela peut paraître étrange que les voileries paient les fournisseurs de fibres pour fabriquer des fils à partir de filaments et dépensent ensuite beaucoup d'argent pour de nouveau séparer ces filaments. Considérons un morceau de carbone 3K à 3 000 filaments. Si vous étalez tous les filaments, vous en obtiendrez 3 000 qui se toucheront côte à côte. Il faut alors imaginer 3 000 brins de paille fins sur une seule épaisseur. À titre de comparaison, un filament de carbone mesure 7 microns de diamètre, un filament d'aramide 12, et un cheveu humain environ 50 microns. L'étalement combiné à l'utilisation de films très

9 En fait, une société appelée Regency vendait du film PVC au début des années quatre-vingt. Ce produit n'a cependant jamais connu de succès commercial.

10 Pendant six ans, North et Sobstad se sont battus pour savoir si le 3DL avait enfreint le brevet « AirFrame ». Finalement, North et Sobstad sont parvenus à un accord à l'amiable.

Des sociétés comme DuPont ou Toray vendent de l'aramide ou du carbone sous forme de filaments torsadés en faisceau, ou sous forme de faisceaux plus gros. Dans le procédé de 3Di, North – comme Cuben Fiber avant, ainsi que d'autres sociétés – détorsade le carbone, le Spectra/Dyneema, ou l'aramide et les étale côte à côte en filaments. Cela montre bien l'analogie des 3 000 « brins de paille ». Le résultat est un composite plus fin pour un allongement donné. (Photo Peter Gustafsson.)

minces donne une bande adhésive très légère et permet de produire un laminé plus fin pour un allongement donné[11].

La fabrication du Cuben Fiber requiert une machine spécifique, un « Pregger », qui sépare et étale les filaments. Ces derniers sont ensuite imprégnés d'adhésif. On obtient des bandes filamentaires (connues sous le nom d'« unitape » ou bande unidirectionnelle) que l'on recouvre manuellement d'un film de chaque côté. Enfin, on place ces bandes relativement courtes en autoclave, et on les fait cuire à haute température et sous haute pression. L'équipe d'Amalgam s'est inspirée du concept unitape de Cuben Fiber en s'affranchissant des films. Le concept en soi était incroyable et la réalisation plus encore. Les maillons faibles de tout matériau laminé sont le film et le type de résine nécessaire pour coller un matériau de faible énergie de surface comme le Mylar. Cela vaut pour le 3DL aujourd'hui ou toute autre membrane 2D concurrentielle.

3Di : La minceur par excellence

Dès le début, North avait compris que le 3Di n'était pas un laminé typique. En tant que composite, tout comme le mât, le gréement des bateaux de compétition et le bateau lui-même, le 3Di annonçait une évolution majeure, peut-être même plus importante que le passage de voiles tri-radiales à panneaux aux voiles 3DL. Pourtant, des éléments clés de la technologie 3DL allaient jouer un rôle dans ce changement. Tout d'abord, le nom est apparu. North pressentait que le nom devait contenir l'appellation 3D ; le nouveau produit serait une extension de tout le savoir-faire acquis grâce au 3DL. Non sans débattre, le nom « 3Dice » avait été choisi, parce qu'il représentait l'idée de ce qu'est vraiment ce type de voile : un « élément composite 3D entrelacé ». Pour ne pas dévoiler cette information, l'équipe marketing a rassuré les créateurs du concept quant au fait que seul un nom générique serait divulgué au public. D'où 3Di[12].

Gérard Gautier, du groupe Amalgam, et Dan Neri, directeur de production et du design pour North, à la tête du projet, ont commencé le processus de développement laborieux, difficile mais loin d'être ennuyeux. Alors que la force de North n'était pas dans la création ou la découverte de l'idée novatrice, l'entreprise avait fait preuve de son aptitude à la mettre au point. Pourtant, le projet 3Di s'avérait complexe, malgré son apparence simple de prime abord.

Comme relaté dans le chapitre 2, les matériaux de base dans le secteur de la voilerie n'ont pas connu de progrès significatifs depuis des décennies. Le plus récent étant l'utilisation du carbone mis en œuvre pour la première fois par North en 1992 dans la Coupe de l'America. Le 3Di, donc, est une autre bonne illustration des progrès dans l'exploitation des propriétés des matériaux existants.

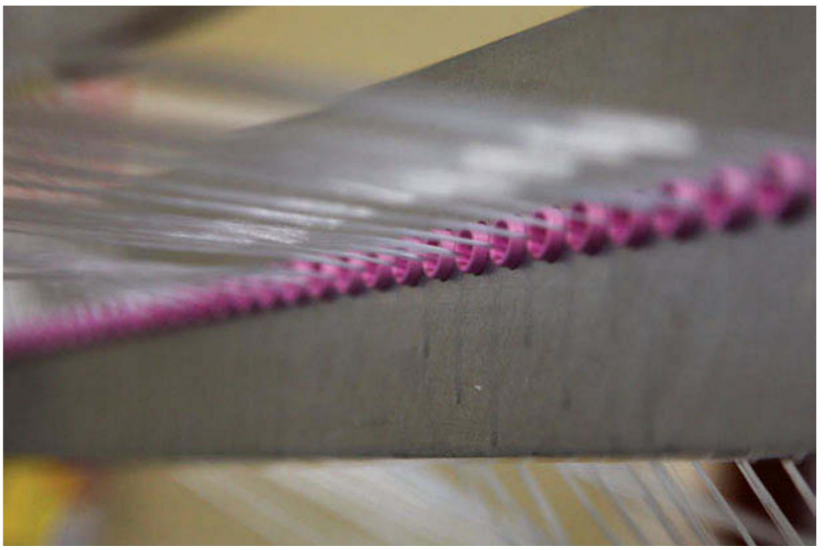
Alors qu'Amalgam avait utilisé le PBO, Gautier et Neri savaient que ce n'était pas une option pour le 3Di. Le marché n'accepterait pas un fil qui avait lamentablement échoué dix ans auparavant. En même temps, ils reconnaissaient que le 3Di 100 pour cent carbone ne fonctionnerait pas. Les filaments de carbone sont cassants. Ce matériau n'aime pas être plié ou fléchi, et c'est exactement ce qui se passe au sein d'un matériau composite 3Di. Que faire ? Une des solutions était alors d'avoir recours à la fibre traditionnelle de croisière haute performance, même si elle n'avait jamais été utilisée avec succès en course, et dont le nom est impossible à se rappeler ou à prononcer : UHMWPE, pour Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (polyéthylène à très haute masse moléculaire). Plus connu sous le nom de

11 Cuben Fiber a aussi développé une méthode pour utiliser des films très minces de 0,16 millimètre d'épaisseur, même encore plus fins. Ces films très minces réduisent le poids par mètre carré pour un allongement donné.

12 Fait intéressant, l'un des concurrents de North a usurpé le nom de « ice » pour l'un de ses produits.

Dyneema en Europe et Spectra en Amérique, et souvent Spectra/Dyneema en voilerie[13].

Face à une audience sceptique, Gautier a expliqué que la combinaison carbone et Spectra/Dyneema permettrait aux fissures microscopiques inévitables dans les filaments de carbone d'être comblées par l'UHMWPE – une fibre qui offre une résistance au pliage supérieure à tout autre matériau. De même, il a exposé à Neri et son équipe que cette combinaison n'altèrerait en rien la capacité du filament de carbone à remplir son rôle. Sa tâche était simple : résister aux charges. Après de nombreux tests en laboratoire, il semblait que Gautier avait raison. Pourtant, North savait que cette théorie devait être encore prouvée en pratique. Il s'est ensuivi une série de tests pour mettre à l'épreuve et valider la justesse de cette théorie. Gautier avait vu juste. Toutes les voiles 3Di, y compris les voiles de course au plus haut niveau, contiennent dorénavant un peu d'UHMWPE.



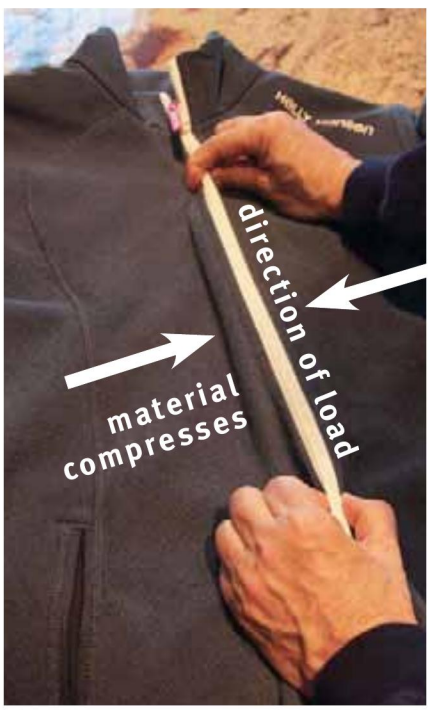
Ci-dessus, les fils détorsadés passent à travers le Pregger. Cette machine implantée à l'usine 3Di à Minden dans le Nevada, aux États-Unis, a pour fonction d'étaler les filaments côte à côte. Le fil que l'on voit sur la photo est du Spectra/Dyneema. (Photo Peter Gustafsson.)

Il existe peu de matériaux adaptés pour les voiles laminées de compétition (chapitre 2). En effet, le carbone et l'aramide représentent plus de 95 pour cent des laminés. Et le PBO n'était pas envisageable. Comme l'UHMWPE s'avérait incontournable, l'équipe s'est tournée vers le meilleur matériau en course : le carbone. Chaque fois qu'un filament autre que l'UHMWPE et le carbone était présenté, il fallait s'attendre à une opposition des membres les plus rebelles de l'équipe 3Di qui craignaient des effets indésirables inattendus. Dans le cas d'un nouveau matériau, un certain nombre de changements subtils (la flexibilité du filament, l'enduit sur ce filament, l'adhérence de l'adhésif, la température de fusion) pourraient rendre la bande filamentaire inutilisable[14]. Ainsi, lorsque le groupe de marketing et de vente de North a demandé que le 3Di soit disponible dans une version moins onéreuse pour correspondre au niveau des prix historiques, il semblait évident de remplacer le carbone coûteux par de l'aramide beaucoup moins cher à l'époque.

Fin 2013, l'équipe de développement y est parvenue, mais non sans difficultés, et après un grand nombre de voiles rejetées et de nombreux essais. Aujourd'hui, le 3Di est proposé dans plusieurs combinaisons de matériaux et de performances. Dans l'ordre croissant, on va de la combinaison aramide/UHMWPE à celle du carbone/UHMWPE avec des ratios variés. Désormais, on a également le polyester pour les produits de croisière sur les bateaux de moins de 45 pieds. Chacune de ces compositions reflète un compromis entre la longévité et la performance. Une fois les problèmes de matériaux résolus, l'équipe était confrontée à un autre défi. Sans film, comment protéger ces filaments de carbone du ragage ? Ce problème s'avérait plus simple. Une couche très mince et légère de ruban adhésif spécifique serait appliquée uniquement sur les deux côtés des bandes exposées aux éléments.

Une fois le composite suffisamment abouti, l'accent était ensuite porté sur l'agencement optimal de ces bandes. De nombreux travaux de recherche sur la disposition optimale des fils 3DL ont été effectués grâce à l'utilisation des outils d'analyse de North. Le 3Di décuplait encore les possibilités. Les concepteurs de North disposaient ainsi d'une vaste panoplie d'agencements possibles. La longueur ou l'axe de la bande à poser n'étaient pas limités par

Ci-dessous, si vous tirez sur un pull, il se contracte dans la direction perpendiculaire des contraintes. Cet exemple illustre le coefficient de Poisson, un phénomène pris en compte dans le procédé 3Di. L'objectif est d'atteindre un allongement constant ou équilibré dans toutes les directions. (Photo Michael Levitt.)



13 Comme indiqué dans le chapitre 2, les maîtres-voiliers se réfèrent à ce matériau comme étant du Spectra/Dyneema et utilisent souvent les fibres indifféremment. Cependant, le Spectra et le Dyneema sont deux produits de marque différente, mais sont tous deux à base de polyéthylène à masse moléculaire ultra-élevée, appelé aussi fibres UHMWPE.

14 Les ingénieurs en composite le nomment « Température de transition vitreuse », ou Tg, qui correspond au moment où un matériau passe d'un état solide à un état liquide ou d'un état liquide à un état solide. C'est un aspect critique de la technologie composite où la chaleur est nécessaire dans le procédé de lamination.

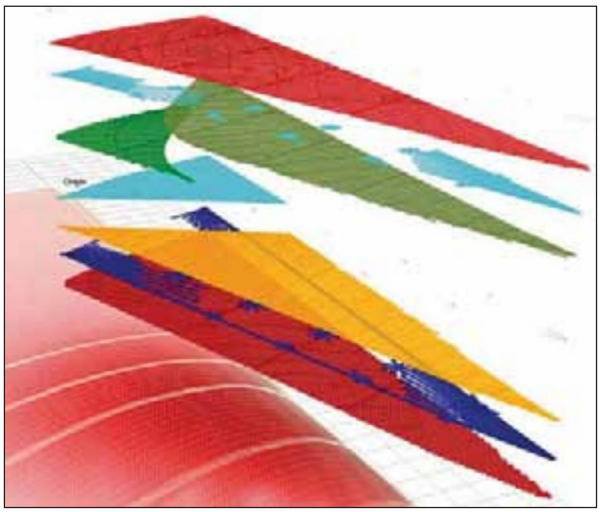


Figure 5.3. Le schéma ci-dessus illustre la disposition des bandes filamentaires ultra-minces en couches, puis thermoulées pour former la voile. Chaque couleur représente une couche différente composée de bandes de filaments. Celles-ci peuvent être de longueur différente et orientées dans toutes les directions, ce qui permet une précision sans précédent pour composer la structure de la voile selon les charges calculées. À noter que tous les renforts d'une voile 3Di (couches bleues) sont appliqués en tant que partie intégrante (interne) du produit composite. Ci-dessus, le bâtiment 2 à Minden, dans le Nevada, où les voiles 3Di sont fabriquées. Les voiles moulées sont également produites dans le bâtiment 1 à Minden et au Sri Lanka. À ce jour, il y a sept machines de dépose pour voiles 3Di à Minden et quatre au Sri Lanka qui étalent les bandes de filaments. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

la machine de dépose. Avec le 3DL où les fils étaient alignés selon des charges anticipées, il y avait davantage de restrictions d'ordre pratique. Avec le 3Di, à l'inverse, la complexité tient à la multitude des possibilités en raison de la nature des composites et du procédé. Les filaments sont alignés dans des directions multiples et forment un ensemble avec la résine ; le module et la résistance à la traction couvrent (presque) toutes les directions.

Le 3Di n'était pas un composite rigide, mais c'était le matériau qui s'en rapprochait le plus en voilerie. Cette conception proche d'un agencement quasi isotrope était donc un véritable défi pour l'équipe de structure de North. L'expertise des ingénieurs de Southern Spars (qui appartient elle aussi au groupe North) n'était malheureusement pas de grand recours, puisque les constructeurs de mâts en carbone utilisent généralement des couches beaucoup plus épaisses ; les deux tiers de ces couches sont concentrés selon la direction 0 (dans la direction du mât) pour obtenir un tube suffisamment rigide[15]. Seul le groupe de Technology North NTPT (Thin-Ply Technology) de North auquel Gautier et Mordasini étaient associés pouvait appréhender ce problème. Ils utilisaient aussi des couches très fines de carbone pour former des composites rigides haute performance. Cependant, Neri jugeait cette méthode plus facile que la production d'un composite souple. En théorie, l'objectif était d'aboutir à un allongement homogène sur l'ensemble de la voile ; c'est-à-dire que lorsque la voile se déforme, ses caractéristiques générales restent les mêmes, même si la forme globale devient un peu plus creuse.

L'équipe réalisait que pour bénéficier des possibilités optimales du concept 3Di, il fallait se tourner vers une structure plus proche de la quasi-isotropie. La structure était donc un changement radical par rapport au 3DL, même si les enseignements tirés de toutes ces années de travail sur les agencements de structure du 3DL au plus haut niveau restaient utiles. Heureusement pour l'équipe, cette approche débouchait sur des améliorations en termes de performance. Mais en quoi se matérialisait la différence ? La méthode traditionnelle pour réduire l'allongement au niveau de la chute est d'ajouter des fils dans la direction des charges. Avec le 3Di, on ajoute davantage de bandes filamentaires. Ensuite, comme indiqué ci-dessus, le procédé 3Di permet une plus grande latitude à la fois dans l'utilisation des divers matériaux et leur interaction. Chaque bande individuelle pouvait comprendre différents filaments de carbone ou d'aramide, toujours combinés au UHMWPE dont le ratio peut également varier. Les possibilités étaient infinies.

Une référence cruciale ici est le coefficient de Siméon Poisson (1781-1840), mathématicien et physicien français. Le test du chandail pourrait être la meilleure illustration de sa théorie : en tirant sur un pull, il se rétrécit dans le sens perpendiculaire à la direction des charges. Le même phénomène se produit avec un élastique. C'est une relation de tension compression. Lorsque vous tirez sur un matériau – tout matériau sujet à une tension –, le coefficient de Poisson détermine la valeur de rétraction dans le sens perpendiculaire. Typiquement, on n'associerait pas la compression aux voiles. Les voiles s'allongent seulement, n'est-ce pas ? Pourtant, la compression a toujours été un facteur clé dans la maîtrise de la forme de la voile en raison de la contraction du Mylar et du coefficient de Poisson. Dans le cadre de la conception du 3Di, même sans tenir compte du problème de la contraction du Mylar, le coefficient de Poisson représentait un problème majeur pour J. B. Braun de North, à la tête de l'équipe de structure du 3Di.

Le carbone et l'aramide présentent une grande résistance à l'allongement, le carbone ayant une résistance supérieure. Autre avantage, ces deux matériaux résistent

15 La seule exception concernait les bandes TPT achetées à North TPT, que Southern Spars utilise pour des mâts de technologie de pointe et pour les bômes.

à la compression. On pourrait dire que leur ratio de Poisson est faible. C'est pourquoi le carbone est le matériau de choix pour les mâts. Cependant, l'UHMWPE, tout en étant très résistant à l'allongement, fluage mis à part, a une résistance très faible à la compression. Soumis à une tension, les filaments d'UHMWPE se contractent dans la direction transversale. Une particularité du composite, plus marquante encore, est qu'il se contractait beaucoup plus que tout autre matériau testé par les concepteurs de North auparavant, cette contraction étant causée par l'UHMWPE. En outre, il se contractait dans des directions inattendues, étant donné la multitude d'orientations des bandes filamentaires. Voilà qui ajoutait aux difficultés qu'un développement empirique n'aurait pu résoudre.

Braun et son équipe se sont donc tournés vers le Design Suite de North pour modéliser ce phénomène et tous les autres facteurs. Pour ce faire, il fallait également modifier le programme d'analyse par éléments finis de North (FEA), Membrain, afin de modéliser les propriétés de l'empilement complet de filaments et leurs orientations uniques dans chaque élément, c'est-à-dire des nappes de filaments. Jusqu'à présent, ce programme ne traitait que les faisceaux de filaments qui agissent indépendamment. Cela a permis de mesurer le module faisceau par faisceau et d'ajouter les totaux pour obtenir un résultat de l'ensemble.

Dans le code Membrain, Michael Richelsen devait appliquer la logique du coefficient de Poisson pour calculer l'impact des multiples orientations agissant comme un composite à l'intérieur de chaque élément du modèle. Une opération plutôt complexe. Toutefois, Richelsen a modifié le code FEA pour un composite souple. Entre-temps, l'équipe de Braun a travaillé sur des simulations de modèles autour d'une grande variété d'options en utilisant un artifice de modélisation surnommé « Tapes as Yarns » qui signifie bandes en tant que faisceau. Certaines de ces bandes ne mesuraient pas plus d'une soixantaine de centimètres.

Alors que l'équipe de conception s'affairait à la modélisation, il était clair, dès les premiers tests de voiles et expériences en laboratoire, que le plus grand souci était de trouver le mélange optimal de filaments de nature différente : le juste équilibre de module (allongement) et de ténacité (résistance). C'était un exercice nouveau pour les designers. Les voiles 3DL ne se déchiraient presque jamais, elles se dégradaient seulement. En réalité, les faisceaux étaient un moyen inefficace pour exploiter le module des filaments. Pour assurer un module suffisant au niveau de la mi-chute, il fallait surdimensionner la structure des coins.

Dans la réalisation du 3DL, North était contraint à une ténacité excessive pour obtenir un module suffisant. En comparaison avec le 3Di, on entrait dans un monde entièrement nouveau. En fait, pour un même kilo de matière (carbone, aramide), les voiles 3Di avaient un module nettement plus important que les voiles 3DL. De plus, tout le poids parasite du Mylar avait disparu. Cela signifiait que pour un module donné, une voile 3Di pouvait être beaucoup plus légère, peut-être jusqu'à 30 pour cent. Pourtant, c'est là que le problème de ténacité refaisait surface.

Le voilier *Spookie* de Steve et Heidi Benjamin arbore des voiles 3Di Raw. Photo datant de 2014. Raw est un produit hybride démuni d'une couche protectrice, et composé d'un textile non tissé imprégné de résine[16]. Développé au cours de la Coupe de l'America de 2013, le Raw permet un gain en poids significatif au détriment d'une légère baisse de longévité. (Photo Onne van der Wal photo/ North Sails, LLC.)

16 Fait intéressant, l'une des dernières déclinaisons du 3Di est appelée Raw. Pour des raisons de performance uniquement (poids, même s'il s'agit d'un petit pourcentage), les voiles Raw se passe de cette fine couche protectrice. Ce nouveau produit a été conçu par Gautier Sergent, sous la direction de Steve Calder, designer de North Sails pour *Artemis* lors de la Coupe de l'America de 2013.

Michael Richelsen, directeur technique de North, est l'un des meilleurs et des plus brillants esprits de l'entreprise. Outre sa longue carrière à North Sails, il a été impliqué dans de nombreuses Coupes de l'America, y compris la 32e Coupe en 2007 avec la victoire d'*Alinghi*, durant laquelle il était responsable de la modélisation numérique d'écoulement des fluides (CFD). Richelsen a été très impliqué dans le projet 3Di. (Photo North Sails, LLC.)

Lorsque North a testé ses premières voiles 3Di très légères, la résistance à l'allongement était excellente avant que la voile ne se déchire en plusieurs morceaux. L'équipe de Braun s'est alors de nouveau plongée dans des modélisations sur Membrain pendant des jours et des jours. Mais ils peinaient à résoudre le problème. Jusqu'à présent, il n'existait pas de méthode de modélisation spécifique de la contrainte en ténacité, car cette caractéristique n'a jamais été un facteur dimensionnant dans les constructions de voiles précédentes. Les premières analyses en ténacité se résumaient à des feuilles de calcul complexes, et de nombreuses extrapolations et interpolations à partir du nombre limité de points de données connus. L'équipe saisissait alors toute l'importance du UHMWPE et la nécessité d'une couche extérieure contre le ragage. Celle-ci ne concernait pas les bateaux de compétition. Et c'était à ce moment-là que les effets positifs et négatifs du coefficient de Poisson ont été pleinement intégrés dans la structure du 3Di. À plusieurs reprises, les concepteurs ont modifié la structure de bandes d'apparence logique. En dépit d'une nette amélioration à un endroit de la voile, l'équipe rencontrait encore quelques difficultés. Aussi, pour éviter toute conséquence inattendue, en dehors des projets de haut niveau et prototypes R&D, North ne met à jour la structure de bande qu'une fois par an pour garantir à ses clients qualité et consistance.

Rappelons que le but ultime de toute structure de voile est une déformation homogène ; c'est-à-dire que la voile s'allonge et se contracte de manière égale sur toute sa surface. Quand on considère la difficulté d'atteindre cet objectif sur une voile à panneaux en polyester avec si peu de points de contrôle (nombre de panneaux), on peut comprendre les possibilités infinies avec le 3Di et ses milliers de bandes. En ce sens et d'un point de vue technologique, le 3Di a dépassé son prédécesseur : le 3DL.

L'étape suivante consistait à déterminer la méthode de fabrication. Certaines pratiques étaient empruntées au 3DL. Mais il a fallu aussi développer de nouvelles applications.

Construire des voiles 3Di « Ce projet n'est pas destiné aux enfants »

ÉTAPE 1 – SÉPARATION DES FILS EN FILAMENTS

Étalez le maximum de fils possible et enduisez-les avec une résine qui ne polymérise pas immédiatement. C'est ce qu'on appelle la pré-imprégnation, ou encore pré-preg. La difficulté est la formulation, à savoir le dosage et le type de résine par rapport au catalyseur et aux filaments. La viscosité de la résine, la friction des rouleaux sur lesquels les bandes passent, la vitesse du tapis roulant, la température du four, le système d'enroulement des bandes et la tension lors de l'enroulement sont autant de paramètres qu'il a fallu mettre au point. Comment ? Grâce à la méthode classique, c'est-à-dire empirique, ainsi qu'à de nombreux travaux de recherche en laboratoire.

ÉTAPE 2 – DÉPOSE DES BANDES PRÉ-PREG

Une machine de dépose de bandes filamentaires – on en compte aujourd'hui sept à Minden (Nevada, États-Unis) et cinq au Sri Lanka – est équipée d'une tête de dépose montée sur un mini-pont roulant. La machine dépose une bande en se déplaçant de quelques décimètres, par exemple, d'un coin à un angle donné. La tête coupe la bande, pivote sur elle-même et dépose une autre bande selon un angle légèrement différent que le dessinateur aura préalablement défini, et ainsi de suite. Selon le même procédé, et de manière simultanée, la tête peut précisément déposer des renforts pour distribuer les efforts dans la voile. La totalité de la structure de la voile est ainsi réalisée en une seule opération. Certains coins de la voile sont composés de centaines de bandes, alors que d'autres ne nécessitent que quatre bandes, soit le minimum requis à mi-chute : 0 degré, 90 degrés, et deux biais à plus ou moins 45 degrés. Les bandes ne sont pas consolidées à ce stade, mais elles sont suffisamment adhésives pour assurer une cohésion. On peut ainsi transporter les sections non polymérisées pour draper les moules 3D. Pour donner une idée de cette étape de dépose de bandes, la grand-voile de *Comanche*, le 100 pieds de course mis à l'eau en 2014, a une épaisseur d'environ 250 bandes superposées au point d'écoute (voir photo dans ce chapitre et dans ce livre).

En comparaison, pour un bateau de course de 40 pieds, l'empilement au point d'écoute ne serait que de 100 bandes environ. Et, alors que les plus petites voiles ne sont composées que d'une section, une grand-voile 3Di pour un super-yacht Perini Navi nécessite 33 sections.

ÉTAPE 3 – DRAPAGE

Une particularité de cette étape est la jonction en escalier sans surépaisseur. La meilleure analogie est certainement le raccord à languette et rainure propre à la menuiserie. Il en résulte des couches successives jointives continues et sans surépaisseur. Aucune concentration de contrainte n'est créée. C'est un procédé ancien et très ingénieux auquel Gautier et ses associés suisses ont abouti. Ensuite, il reste à draper les moules avec ses sections en les alignant selon les marques faites à cet effet et en les assemblant. De la sorte, ces sections multiples n'en forment plus qu'une seule… enfin pas encore tout à fait.

ÉTAPE 4 – CONSOLIDATION

Grâce à son expérience du 3DL, la lamination ou consolidation n'a posé aucun problème à North Sails. Cela n'est fonction que de la température, du temps et de la pression. Une température X est requise pour fluidifier et activer la résine. Il faut un temps Y pour que la température fasse effet. Et une certaine pression Z est nécessaire pour consolider les filaments dans leur matrice et toutes les couches entre elles. En excès, cette pression est inutile et pourrait avoir des effets négatifs sur le produit fini.

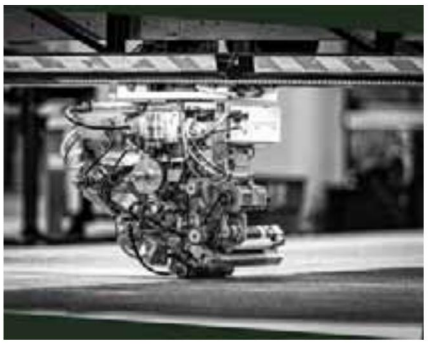
La réelle difficulté était que les sections 2D devaient être thermoformées pour se conformer au moule 3D. C'est assez simple avec un film Mylar qui a tendance à se contracter, mais ce n'est pas le cas pour les filaments et la résine. Loin de là ! C'était une véritable source de remise en question dans les débuts du procédé. Dan Neri se souvient très clairement de la première fois qu'une voile 3Di a été consolidée sur un moule volontairement très cambré. À sa grande surprise, l'opération s'est bien déroulée, et la voile était parfaitement lisse. Pourquoi ? Depuis sa création à l'époque de Lowell North, North Sails a toujours été tournée, avant tout, vers le produit et la conception. Il fallait alors comprendre le phénomène.

À la suite de nombreux essais, on sait désormais qu'une fois les sections 2D drapées et assemblées sur le moule, et sous l'effet de la chaleur, les filaments et toutes les bandes se déplacent les uns par rapport aux autres à un niveau microscopique, permettant à la structure de se conformer au moule 3D. Les filaments, aussitôt pris dans la matrice polymérisée, travaillent à l'unisson pour contrer les allongements dans toutes les directions sur la surface de la voile.

Dans une certaine mesure, la lamination du 3DL est comparable à ce procédé ; seulement, c'était la contraction du Mylar sur les moules 3D sous l'effet de la chaleur qui modifiait légèrement la direction de chaque fil, à la différence du 3Di où chaque fil est décomposé en filaments. La totalité de la surface 3D peut alors se conformer à l'échelle microscopique de chaque filament qui la compose. Le résultat se rapproche d'un profil rigide tout en restant flexible.

ÉTAPE 5 – DÉMOULAGE DE LA PEAU

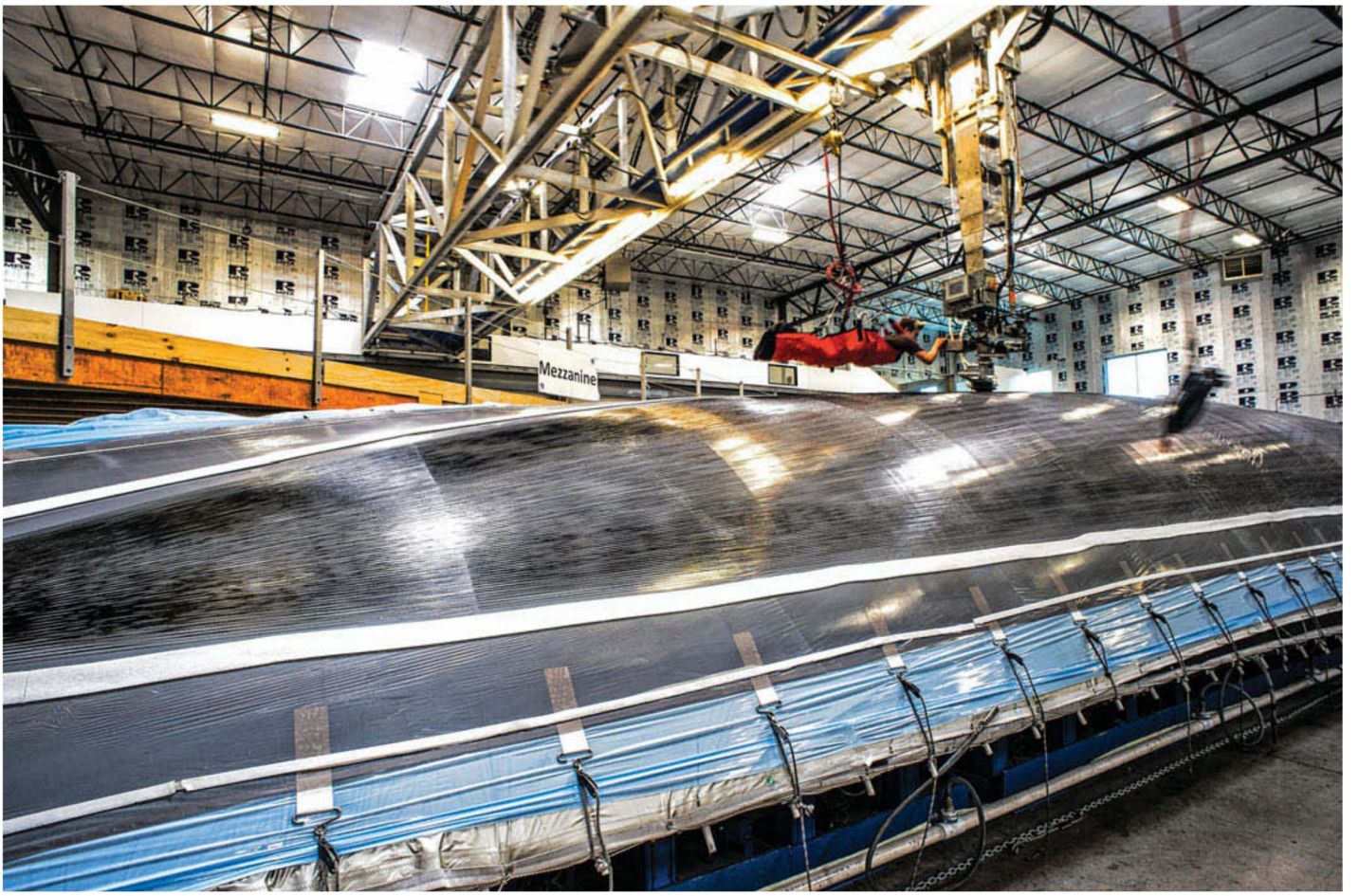
La peau est une structure composite d'un seul tenant. La dernière étape consiste à laisser la résine polymériser complètement pendant quelques jours. Puis, dans la phase de finition, on ajoute l'accastillage nécessaire sur la voile. Là encore, le 3Di tranche avec le 3DL dans la mesure où North est capable d'apposer tous les renforts et fourreaux de lattes en tant que partie intégrante de la peau, réduisant considérablement le temps de finition et la complexité de cette opération.



Une machine à trois axes CNC, appelée « Tapehead », pose des bandes 3Di selon des configurations spécifiques. Actuellement, la machine dépose une bande, la coupe, pivote et étale une autre bande à un angle légèrement différent. Tout cela est programmé par le dessinateur de voiles. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

Premiers tests

Le premier test significatif du procédé 3DL a eu lieu en 1992 durant la campagne la plus exigeante et la plus exposée de la Coupe de l'America : l'équipe *Stars & Stripes* de Dennis



La température, le temps et la pression sont les éléments clés d'une lamination réussie, que ce soit pour le 3Di ou le 3DL. Observez la mise en forme 3D radiale de la voile. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

Conner. Pour tester la première voile 3Di de grande taille, North a également choisi l'un des projets les plus en vue à l'époque, la campagne Volvo Ocean Race d'*Ericsson*. Cette voile était un reacher, construite selon la méthode expliquée ci-dessus. Elle a résisté environ dix heures avant de se déchirer en morceaux. L'équipe de North 3Di était ravie du compte rendu de Steve Calder, le dessinateur de la voile et membre de l'équipe *Ericsson* à l'époque. Certes, ils n'étaient pas ravis d'apprendre que la voile avait volé en éclats, mais ils étaient très satisfaits de sa résistance à l'étirement avant rupture. Antérieurement à cet épisode, l'équipe des maîtres-voiliers savait qu'elle n'était qu'au début de la courbe de développement du 3Di. Ces dix heures auront suffi à susciter l'intérêt de l'équipage pour la tenue de forme du 3Di et à fournir à Dan Neri et son équipe les informations nécessaires en vue d'améliorer le procédé de fabrication.

Moment opportun

Le brevet de North Sails pour le 3DL allait expirer en 2011. Le moment était propice à une nouvelle technologie brevetée de North. Rétrospectivement, le développement du 3Di – technologie qui domine maintenant dans l'arène des grandes compétitions – valait la peine de prendre des risques. Cela dit, de nombreuses personnes au sein de la compagnie comme à l'extérieur doutaient de la portée d'un tel investissement, étant donné le succès et la domination du 3DL. Mais parce que les concurrents de North avaient réussi à créer des copies décentes 2D du 3DL, qui avaient l'apparence et semblaient se comporter comme des voiles 3DL, il était temps de passer à une autre technologie : celle du 3Di. En outre, le 3Di s'est avéré plus performant sur un point important : les voiles 3Di sont plus durables pour une vitesse donnée (c'est-à-dire, vitesse par heure d'utilisation). Elles se révèlent également plus rapides dans une plage plus large de conditions de vent. Certaines personnes ont même

suggéré que le 3Di porterait préjudice à North simplement parce que les voiles 3Di duraient plus longtemps que prévu.

Naviguer avec des voiles 3Di

Le réglage des voiles 3Di et les manœuvres à la barre sont radicalement différents. À ses débuts, le 3Di était souvent critiqué pour son aspect carton ; les équipiers d'avant ou numéros 1 n'étaient pas aux anges. Et la raideur au toucher rendait le tissu 3Di plus difficile à déventer sur le guindant. Lorsque le barreur naviguait un peu haut, une voile d'avant 3Di restait difficile à lire. Cela contraignait les barreurs à mieux observer la voile et à se fier davantage aux penons dans les manœuvres à la barre. Cette technique était la plus efficace. Désormais, les voiles 3Di sont très souples.

Avec le 3Di, les régleurs de voiles font également face à une nouvelle façon de naviguer. Un régleur de voiles d'avant est toujours surpris la première fois de constater les faibles oscillations des voiles 3Di. Le flux d'air est rarement régulier, même quand il semble l'être. De légers changements de vitesse du vent écartent ou approchent la voile d'avant des barres de flèche. Les régleurs inexpérimentés le remarquent rarement. Les régleurs pros le distinguent très clairement, même si l'amplitude de ce mouvement n'est que de quelques centimètres. Les oscillations sont tout simplement de l'allongement. Grâce à cette absence d'oscillations, les dessinateurs de North et les premiers utilisateurs ont réalisé que le 3Di était fidèle à leur modélisation. En tant que tel, le réglage est plus fin. Les voiles 3Di sont beaucoup plus réactives aux petits ajustements du devers d'étai et à la tension de l'écoute que les voiles de conception plus ancienne et plus élastique. D'une certaine manière, cela facilite le réglage, car une fois la voile ajustée au niveau des barres de flèche dans une brise établie, elle ne bouge pas. Le 3Di étant plus réactif, il est aussi plus exigeant. En même temps, les gains sont plus importants et l'apprentissage plus rapide. Pourquoi ? Parce que le régleur bénéficie d'informations instantanées des instruments et d'un barreur expérimenté.

C'est la même chose pour les grands-voiles, où les tolérances sont encore moindres. Les ajustements légers au niveau de la chute provoquent des changements instantanés de sensation à la barre et de la VMG. Les voiles de conception ancienne se déforment (s'aplatissent et se creusent) et oscillent ; c'est-à-dire que leur chute s'ouvre et se ferme, tout comme sur les voiles d'avant. Le 3Di nécessite moins d'amplitude de réglages, surtout pour la tension d'écoute, mais chaque réglage aura un impact plus important sur la performance du bateau. La récompense est tout aussi instantanée que la pénalité quand on ne s'adapte pas aux variations constantes de la vitesse du vent.

Les changements dans le cintre du mât sont plus facilement détectés sur les grands-voiles 3Di que sur n'importe quelle autre technologie de voile. De tels changements peuvent être volontairement provoqués par le régleur de grands-voiles en choquant l'écoute ou le pataras ou les deux à la fois. Tout comme ils peuvent être produits par inadvertance par le régleur de foc en choquant l'écoute, ce qui relâche l'étai et réduit le cintre du mât. Par exemple, si un mât est trop cintré, des plis apparaissent sur la grand-voile généralement du point d'écoute jusqu'au milieu du mât environ[17]. Sur une grand-voile élastique, ces plis sont en partie absorbés par l'allongement du tissu. Sur une grand-voile composite 3Di, ils apparaissent immédiatement et sont plus prononcés, les grands-voiles 3Di étant plus sensibles. Par contre, ces plis sont le signe d'une erreur de réglage.

17 Cela suppose que le mât est correctement réglé. Voir le chapitre 7 sur le réglage de la grand-voile.

Notez la complexité du mécanisme pour façonner le moule. Un exemple se trouve à la page 104. Ce système complexe repose sur l'exigence de répétabilité dans la forme des voiles. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

Le point d'utilisation idéal

Toutes les voiles, qu'elles soient à panneaux ou moulées, ont une zone de fonctionnement idéal : une plage de vent où elles performent le mieux. Parce que les voiles 3Di sont thermomoulées et moins élastiques, elles se gonflent – assument leur forme optimale – plus tôt dans l'éventail de conditions de vent. Cela facilite les virements de bord et permet au bateau d'accélérer plus vite. Et parce qu'une voile moulée est structurellement plus efficace qu'une voile à panneaux, elle conservera sa forme plus longtemps, ce qui la rend plus performante sur une plus large plage de vent par rapport à une voile à panneaux. En somme, elle possède une plus grande zone de fonctionnement idéal.

Poids, longévité et plage d'utilisation

Dotées d'un ratio module-poids significativement plus élevé que toute autre voile, les voiles 3Di peuvent être plus légères pour un module donné. À l'exception des bateaux de course de pointe, North s'est abstenue de faire trop léger. De loin, la majorité des marins privilégient la longévité par rapport à la vitesse. Comme indiqué plus haut, avec le 3Di, on a l'impression d'avoir le beurre et l'argent du beurre, c'est-à-dire la longévité et la vitesse à la fois. De nos jours, dans les campagnes de compétition de haut niveau, les marins se contentent de 10 à 20 heures de régate pour un foc 3Di, mais la moyenne des coureurs exige trois saisons d'utilisation en raison de leurs budgets. Quelques voiliers high-tech comptent plus de 200 heures de navigation avec certaines grands-voiles 3Di. Dans le cas de la Volvo Ocean Race, l'une des courses au large les plus exigeantes, le nombre d'heures passe à 3 500, durant un tour du monde, comme sur le voilier *Sodebo*, jusqu'à presque 5 000 heures.

Dans les éditions 2014-2015 et 2017-2018 de la Volvo Ocean Race, les organisateurs ont privilégié le 3Di pour tous les focs et grands-voiles. Pour la dernière édition, toutes les voiles sont en 3Di, même le spi. Le nombre total de voiles dans l'inventaire 2014-2015 est tombé à 11 (7 à bord et 4 de rechange). Aux deux éditions précédentes, les bateaux en transportaient 17 dont 8 à bord (2012), et 24 en 2009. Bien avant encore, on comptait 38 voiles. Difficile alors de trouver meilleure preuve de longévité du 3Di.

Cependant, il ne fait aucun doute que la bonne utilisation de toute voile dans sa plage prolonge considérablement sa durée de vie, et le 3Di ne fait pas exception. En pliant et stockant correctement les voiles, on les conserve plus longtemps. Rappelez-vous la discussion concernant les filaments de carbone qui subissent des micro-fractures sous la flexion et la façon dont les filaments de Spectra transfèrent la charge d'un filament de carbone à l'autre. Eh bien, il y a une limite. Avec une fatigue en flexion suffisante, une voile 3Di finira par se décomposer. Bien que ce ne soit pas aussi évident avec le 3Di qu'avec le 3DL, les copies 3DL et surtout les voiles à panneaux, une nouvelle voile 3Di neuve sera plus rapide qu'une ancienne.

Le bateau *Alvimedica* entouré de dauphins au cours d'une étape de la Volvo Ocean Race de 2014-2015. Course de 38,739 nm autour du monde en neuf mois. North a fabriqué toutes les voiles en 3Di pour les sept monotypes Volvo 65. Selon les règles établies, l'inventaire des voiles a été réduit à 11 voiles au lieu de 17 lors de l'édition précédente. Les voiles ont été construites à partir de bandes pré-imprégnées en aramide Twaron de couleur noire et de fibres Dyneema SK75 de teinte claire. L'inventaire comprend une grand-voile, avec trois ris et six lattes, un J1, J2, J3, A3 (gennaker), Code 0 fractionnel (FR0), Code 0 en tête (MH0), et un J4. Ce dernier est le seul tourmentin autorisé dans la course. (Photo Amory Ross /Volvo Ocean Race.)

VOLVO OCEAN RACE
NED 1
Brunel
SCHOUTEN
modulex
medical
SCA

La voile numérique

L'appellation CAO désigne la *conception assistée par ordinateur*. Aujourd'hui, la fabrication de voiles de course haut de gamme repose autant sur cette technologie que sur les matériaux et les techniques abordés dans les chapitres précédents. La CAO ne se limite pas à l'édition d'un simple dessin ; elle comprend également la modélisation numérique et la partie analytique de la fabrication des voiles.

L'objectif de cet outil consiste à modéliser numériquement des voiles pour mener une série d'expériences sur ordinateur, et non plus sur le plancher de la voilerie. L'intérêt n'est pas d'ordre économique, bien au contraire. Il faut des années d'expérience et d'implication à un dessinateur de voiles pour bien comprendre et interpréter correctement les résultats de la modélisation. À cela s'ajoute un énorme investissement financier dans les logiciels. Le fait est que les essais en mer – qui ont fait la réputation de Ted Hood et Lowell North (du moins jusqu'à ce que Lowell North rencontre Heiner Meldner) – sont chronophages et difficiles à mettre en œuvre.

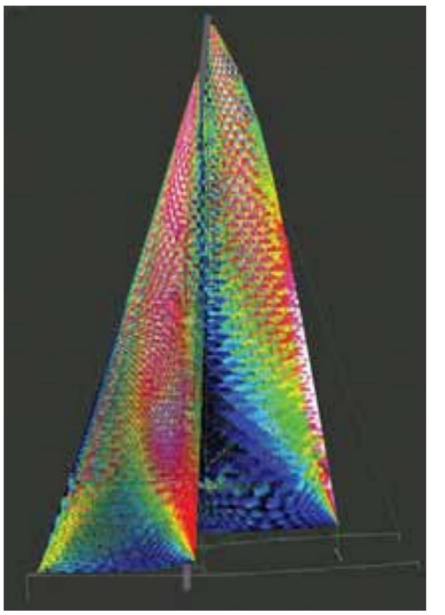
L'équilibre des forces aérodynamiques et hydrodynamiques

Dans le chapitre 4, nous avons évoqué l'interaction de la coque et du gréement ainsi que la corrélation entre les forces et les moments exercés sur ces derniers. En fait, les forces aérodynamiques et hydrodynamiques doivent être à l'équilibre. Si le centre d'effort (CE) de la quille n'était pas étroitement aligné avec le CE du plan de voilure, le bateau pourrait être trop ardent ou trop mou, et n'avancerait pas en ligne droite.

Cette première partie met l'accent sur l'aspect aérodynamique : les forces et les moments qui agissent au-dessus du pont. Pour simplifier notre propos, on suppose disposer d'un modèle hydrodynamique précis, notamment une dérive, et d'angles de safran réalistes. De manière générale, l'objectif est de discerner une tendance (une amélioration) en VMG liée à un changement dans la forme ou la taille d'une voile. Rappelons que VMG (*Velocity Made Good*) signifie *vitesse effective vers la bouée au vent ou sous le vent*. Pour s'affranchir de la complexité des données d'entrée, on doit poser certaines hypothèses.

L'hypothèse de base consiste à supposer l'équilibre du bateau entre, d'un côté, la force aérodynamique latérale du gréement et des voiles et, de l'autre, la force hydrodynamique générée principalement par la quille. À partir de là, un dessinateur peut déterminer les moments de redressement pour différentes conditions de vent. Dans ce cas, la force de propulsion – le vecteur résultant de toutes les forces et de tous les moments – indiquera la tendance. Dans la simulation numérique, on s'intéresse davantage à la tendance qu'à la valeur absolue. Par exemple, le concepteur peut expérimenter plusieurs profils plus ou moins tendus sur les arrières. Si la force de propulsion augmente pour une force de gîte constante, il sait que le changement est positif. Mais la tâche suivante est plus complexe : s'assurer que le changement est suffisant pour être significatif. Ce n'est certainement pas la méthode la plus précise. Par exemple, un changement dans la forme de la voile, lié à l'augmentation de la force de gîte, pourrait entraîner une dérive ou un angle de safran plus élevés, lié à l'augmentation de la force de gîte. Ces deux paramètres affecteraient la VMG au près.[1]

Un VPP (*Velocity Prediction Program*) élaboré comprend six degrés de liberté. Trois moments : tangage, roulis/redressement (rotation autour de l'axe longitudinal), lacet (rotation autour de l'axe vertical avec un angle de safran qui équilibre la dérive) et trois



Ce graphique du programme Membrain FEA (analyse structurelle par éléments finis) de North est une représentation des contraintes dans les fils (élongation). Les zones rouges et blanches indiquent une valeur plus importante et la zone bleue une valeur plus faible. Le mélange des couleurs correspond à la superposition de plusieurs couches de filaments dans une voile 3Di. C'est-à-dire que, comme ces filaments sont orientés dans de multiples directions sur une même section de la voile, les multiples allongements sont mesurés et affichés. Cette capture d'écran représente l'un des nombreux graphiques qu'un concepteur de North peut analyser. (Photo North Sails, LLC.)

Derrière la beauté spectaculaire qu'offre la voile, illustrée ici par cette photo (départ de la deuxième étape de la Volvo Ocean Race 2014-2015 de Cape Town à Abu Dhabi), se cache une impressionnante technologie. (Photo Ainhoa Sanchez/Volvo Ocean Race.)

1 Nous recommandons cette méthode pour toute modification apportée à un bateau ou un gréement. Effectuez un changement assez significatif tout en conservant toutes les autres variables aussi constantes que possible. Ensuite, décelez une différence d'une façon ou d'une autre.

Le bouchain (changement d'angle serré) est visible sur le côté au vent du Volvo 65 de *Dongfeng*. Une fois que le bouchain au côté sous le vent entre au contact de l'eau, à environ 35 degrés de gîte, le moment de roulis d'inertie est considérablement réduit et la stabilité fortement augmentée. (Photo Yvan Zedda/Dongfeng Race Team.)

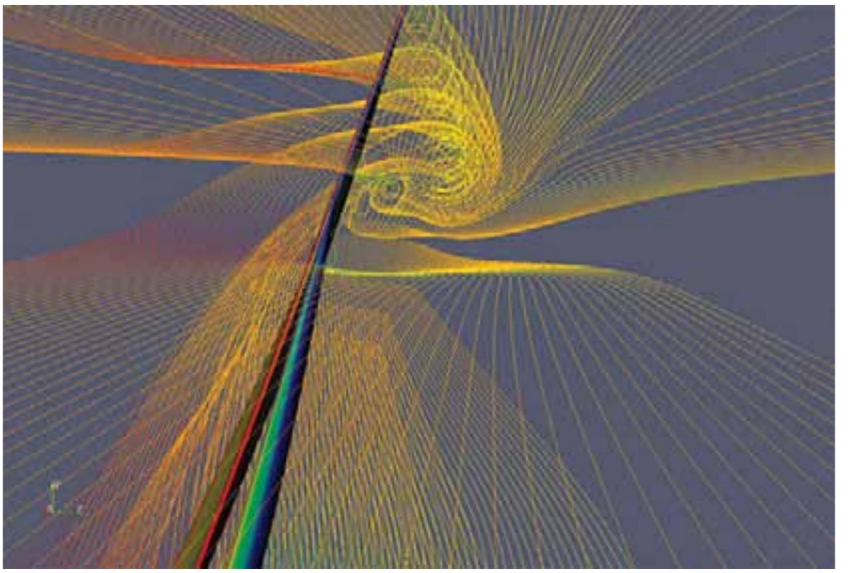
forces : gîte, entraînement ou propulsion, force verticale (force exerçant une pression sur le bateau vers le bas lorsqu'il gîte). Un VPP à un seul degré de liberté est très simpliste : dans ce cas, seul le moment de redressement n'est pas figé, et l'équilibre des autres forces et moments est imposé. Il s'agit du procédé le moins précis, mais il permet d'obtenir rapidement des éléments de réponse. Les tests en bassin de carène et le VPP que North utilise résolvent généralement quatre des six degrés de liberté (tous à l'exception de la force verticale et du moment de tangage). Les VPP utilisés dans les règles de jauge ne tiennent pas compte d'un troisième degré de liberté : le moment de lacet. Mais ce dernier est important puisqu'il permet de déterminer l'angle de safran. Ces VPP sont donc limités.

Toutefois, si le dessinateur accède aux résultats d'un VPP élaboré pour un bateau donné, il est en mesure d'appréhender les moments de redressement pour différentes conditions de vent. Il joue alors sur quatre degrés de liberté : variation de la force latérale et de la force de propulsion ainsi que leurs impacts respectifs sur le moment de lacet et de roulis. Le moment de lacet est la tendance du bateau à lofer ou abattre. Le moment de gîte, ou roulis, est la tendance pour le gréement et les voiles à gîter autour de l'axe longitudinal du bateau. Le phénomène opposé est le moment de redressement principalement généré par la quille. Le moment de roulis est une mesure statique. Par contre, le moment de gîte dynamique correspond à l'angle de roulis du bateau (c'est-à-dire la gîte) sous l'impulsion d'une grosse vague ou d'une rafale de vent. La forme de la coque a un effet prépondérant sur le moment dynamique de roulis.

Une vitesse de vent réel (*True Wind Speed, TWS*) de 17 nœuds, par exemple, augmenterait la force de propulsion par rapport à une TWS inférieure. Mais elle accroîtrait également la force latérale qui influe sur les moments de lacet et de roulis. Comme nous le verrons ci-dessous, ces données peuvent être intégrées dans le VPP pour affiner le changement net en VMG.

Compte tenu de l'allongement et de la déformation des voiles sous la force du vent, la modélisation s'avère bien plus complexe que la saisie d'un dessin dans la soufflerie

numérique et l'application des pressions qui en résultent sur le plan de voilure. Le dessinateur doit itérer le processus de couplage aéro-élastique entre les pressions créées par une forme de voile dans des conditions de vent données et les déformations ainsi que l'allongement des voiles générées par ces pressions. Par exemple, si le dessinateur borde un foc plus fort en donnée d'entrée du VPP, le vrillage (flèche à mi-chute) est réduit. C'est une déformation. Si l'écoulement croît alors que tous les autres facteurs demeurent constants, le vrillage de la chute augmente. Une partie de ce vrillage est due à l'allongement et l'autre à la déformation. Cet exemple illustre la différence entre l'allongement et la déformation.



S'il fallait représenter sur un graphique les effets négatifs des tourbillons marginaux décrits dans les chapitres 3 et 4, en voici l'illustration. Cette capture d'écran, issue d'une analyse par code RANS/CFD, illustre les tourbillons marginaux provenant principalement du haut de la chute de la grand-voile sur un voilier à gréement fractionné. Il s'agit d'une prise de vue vers l'arrière et le sommet du gréement et des voiles, juste sous le vent et en avant de l'écoulement en amont. On peut distinguer trois tranches de flux d'entrée et les changements de direction qui en résultent. Les couleurs rougeâtres indiquent un écoulement plus lent. Aujourd'hui, alors qu'elles constituent la base des codes RANS, les équations de Navier-Stokes ne permettent d'analyser que les écoulements simplistes sur une plaque, l'écoulement d'entrée situé au vent des voiles. Les couleurs rougeâtres indiquent un écoulement plus lent relativement à l'écoulement d'entrée situé au vent des voiles. Les couleurs vertes et jaunes correspondent à des vitesses plus élevées par rapport à l'écoulement d'entrée censé se trouver sous le vent des voiles. Notez que les tourbillons sont à des vitesses plus élevées, ce qui est cohérent étant donné qu'ils ont un trajet plus long à parcourir avant qu'ils ne rejoignent le flux normal, 10-20 longueurs de bateau sous le vent du bateau. (North Sails, LLC.)

La mécanique des fluides numérique et l'analyse par éléments finis

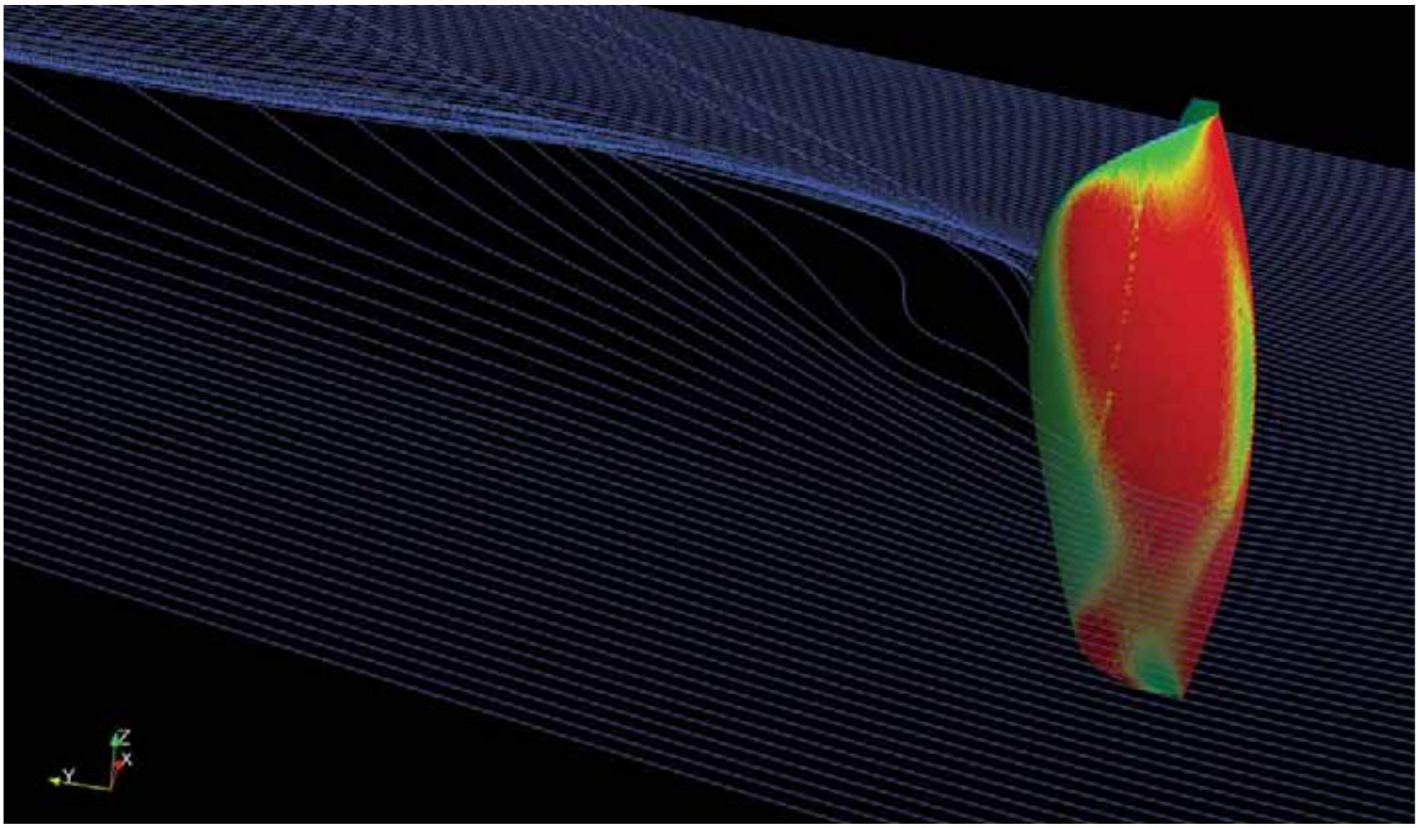
Le procédé itératif décrit ci-dessus met en jeu deux catégories distinctes de logiciels : la mécanique des fluides numérique, désignée le plus souvent par le sigle anglais CFD (*Computational Fluid Dynamics*), et l'analyse par éléments finis, FEA (*Finite Element Analysis*). Le code CFD est une soufflerie numérique qui modélise un écoulement. Le code FEA calcule à la fois l'allongement (l'élongation d'un matériau) et les contraintes (les charges exercées sur les voiles) qui sont générées par les pressions calculées par les modèles CFD.

Il existe deux types répandus de codes CFD : Navier-Stokes (du nom des mathématiciens Henri Navier et George Stokes) et code à panneaux. Le code le plus commun de Navier-Stokes est un code RANS qui signifie Reynolds Averaged Navier-Stokes. L'équation moyenne de Reynolds est une simplification nécessaire de la théorie de Navier-Stokes, un ensemble d'équations très complexes rendues publiques en 1822. Cette simplification avait pour objectif d'évaluer l'effet de la turbulence qui, dans un code RANS, est régi par ce qu'on appelle « modèle de turbulence ». Aujourd'hui, alors qu'elles constituent la base des codes RANS, les équations de Navier-Stokes ne permettent d'analyser que les écoulements simplistes sur une plaque. Pour cette raison, en pratique, elles ne sont pas utilisées seules.

Pour comprendre la différence entre un code à panneaux et un code RANS, il faut revenir à nos premiers aérodynamiciens du début du XX^{e} siècle (chapitre 3). Il était question d'écoulements visqueux (avec frottement) et non visqueux (sans frottement).

Sans frottement, il n'y a pas de traînée visqueuse, mais bien une traînée induite. En l'absence de traînée visqueuse, la seule portance générée est issue de la circulation d'un fluide potentiel, et elle est environ de 15 à 20 pour cent plus grande qu'en présence de frottement. Le frottement induit une séparation, ce qui se traduit par un sillage plus épais car la condition de Kutta n'est pas vérifiée, et rend ainsi la modélisation difficile. C'est pourquoi nos tout premiers aérodynamiciens posaient l'hypothèse d'écoulements non visqueux dans leur modélisation. De fait, ils utilisaient les mêmes équations que celles des codes à panneaux mais sans les avantages de l'ère numérique. Quatre-vingt-cinq ans plus tôt, la situation n'était guère différente pour Henri Navier et George Stokes. Il s'agit là d'un fait très intéressant. Dans la plupart des cas, la technologie engendre l'innovation alors que, dans ce contexte, l'innovation devançait son application concrète. On peut imaginer la frustration des scientifiques de cette époque. Les codes RANS apparus au début des années quatre-vingt ont connu un scénario similaire. L'utilisation des ordinateurs était alors en plein essor, mais la vitesse, et surtout la mémoire vive, faisaient cruellement défaut.

Un code RANS tient compte de la viscosité, c'est donc un modèle turbulent. En fait, le code RANS fait abstraction de l'écoulement laminaire. Cela dit, la turbulence est essentiellement un module interchangeable : le concepteur utilisant cet outil a recours à un modèle turbulent spécifique en fonction de la nature de l'écoulement modélisé. D'ailleurs,



Ce modèle de « contrainte de surface » définit une mesure de frottement de surface à la suite d'une analyse RANS pour un spinnaker asymétrique, représenté ici par une couche horizontale à mi-hauteur du guindant. Les sections rouges représentent les zones de frottement élevé, la séparation est donc faible. Les sections vertes représentent les zones de non-frottement, la séparation est donc importante. Nous voyons une bulle de séparation au niveau du guindant, une autre au point d'amure et une troisième en tête. Selon la plage d'utilisation cible de ce spinnaker asymétrique, le changement soudain de l'écoulement qui se sépare près de la chute pourrait être le plus préoccupant. Fait intéressant, le problème qui se pose dans ce modèle est probablement que la voile est surbordée. La séparation au niveau du guindant en est un signe. Cela rappelle une expression bien courante dans l'informatique : à données erronées, résultats inexacts.
(Photo North Sails, LLC.)

on utilise des modèles de turbulence similaires pour les ailes d'avion et les voiles malgré l'énorme différence des vitesses d'écoulement. La turbulence permet une modélisation plus proche des conditions réelles en condition de navigation. Elle permet notamment de tenir compte de la séparation et, par conséquent, des diverses formes de traînées visqueuses.

À cette fin, on commence par représenter le domaine fluide, à savoir un modèle numérique de soufflerie. Le programme discrétise le domaine fluide en un maillage 3D de cellules. À chaque cellule, on associe une valeur de vitesse et de pression calculée, et ce, à chaque itération. Par conséquent, le nombre total de paramètres indépendants croît avec la complexité du maillage et peut avoisiner les dizaines de millions, d'où une puissance de calcul considérable. Au tout début, à North Sails, les dessinateurs n'avaient pas d'autre solution que d'utiliser le code à panneaux de North appelé « Flow ». En effet, à l'époque, ils n'avaient pas accès aux superordinateurs Cray qui valaient une petite fortune. Même aujourd'hui, sur le plus rapide des PC quad, les temps de calcul d'un logiciel RANS se comptent en heures.

C'est la raison principale pour laquelle les codes à panneaux, développés dans l'industrie aéronautique dans les années soixante et soixante-dix, existent encore aujourd'hui. Alors qu'un code RANS génère des dizaines de millions de paramètres, un code à panneaux en nécessite moins de 10 000.

Ces codes à panneaux font l'hypothèse d'une couche limite extrêmement mince, insignifiante au regard de la globalité du domaine fluide. En outre, seuls les bords du domaine fluide doivent être analysés, ce qui signifie que le maillage 3D requis dans le code RANS est réduit à une grille 2D beaucoup plus simple. En d'autres termes, le sillage dans un code à panneaux est très mince alors qu'il est plus épais et complexe dans un code RANS à l'image de la réalité. Ceci explique la complexité et le temps de calcul réduits du code à panneaux.

Dans cette configuration, une valeur unique de vitesse d'écoulement est calculée comme étant le potentiel de la vitesse. C'est pourquoi on appelle ces programmes des codes potentiels. Rappelons que la vitesse est directement liée à la pression (chapitre 3). Dans les codes potentiels, la vitesse d'écoulement est déterminée par deux équations simples. La première est la relation de Bernoulli entre la vitesse et la pression. La seconde est l'équation

Majestueux est le terme approprié pour qualifier le Class J *Ranger,* propriété de John Williams. Cette réplique mise à l'eau en 2003 est aussi magnifique que l'original dessiné par Startling Burgess et mis à l'eau en 1937, la même année que sa défense victorieuse dans la Coupe de l'America. De nombreux modèles numériques ont précédé la fabrication de ces superbes voiles 3Di. (Ian Roman/North Sails LLC.)

de Laplace, du nom du mathématicien français Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Encore une fois, force est de constater à quel point l'analyse actuelle des fluides et des voiles repose sur des équations simples datant du XIX[e] siècle[2]. L'équation de Laplace consistait à déterminer le potentiel de vitesse.

En raison de l'absence de séparation, un code potentiel surévalue le coefficient de portance (Cl). Un code RANS, en revanche, tient compte de la séparation. Le code à panneaux suppose toujours une condition de Kutta parfaite, alors que le code RANS met en évidence la différence entre une voile de forme normale et une voile avec des arrières très braqués, parce qu'il tient compte de la séparation qui en découle.

Malgré tout, un code à panneaux a sa raison d'exister. Dans les plages de fonctionnement normal, il fournit des réponses très rapides – cette précieuse tendance. Et, à condition que le cas ne présente pas ou peu de séparation au près, les codes à panneaux produisent des résultats similaires à ceux des codes RANS.

Au portant, cependant, c'est une autre histoire. Une augmentation substantielle de la traînée, par exemple, induit plus de turbulence et de séparation. Ces phénomènes doivent être modélisés. Dans ce cas, les codes à panneaux ne sont pas adaptés. Même un code RANS peine à représenter les larges séparations (le cas d'un spinnaker dans le petit temps par exemple). Lorsque la taille des turbulences augmente, il faut avoir recours à un procédé instationnaire. Cela signifie analyser chaque seconde, et non pas un instant figé dans le temps. Pour ce genre d'analyse, on préférera utiliser un troisième type de code qui se nomme simulation à grande échelle (LES). Toutefois, le nombre de paramètres devient exponentiel, ce qui rend le temps de calcul quasiment rédhibitoire dans le cadre de la voile de compétition au contraire de celui de la recherche universitaire pure.

2 Michael Richelsen, le créateur de North Design Suite, est titulaire d'un doctorat en mathématiques.

FRA 1953
GBR
7236R
esimit

Cette photo, prise au départ de la 63e Coupe Giraglia Rolex en mer Méditerranée (2015), illustre la concrétisation de la modélisation numérique de nombreux Maxi 72. (Photo Carlo Borlenghi/Rolex.)

Donc, en pratique, on aura plutôt recours à une simulation DES (*Detached Eddy Simulation*). C'est une adaptation du code RANS, ce qui la rend moins exigeante que LES, tout en étant beaucoup plus puissante que le code RANS pur. Par définition, le RANS est un code stationnaire. Il est statique. La DES est quasi statique grâce à l'utilisation d'une progression temporelle. Elle requiert évidemment des temps de calcul plus longs que le RANS.

N'oublions pas que comme les bateaux modernes naviguent à des angles de vent apparents de plus en plus serrés, les dessinateurs de voiles ne s'intéressent plus autant à la problématique des voiles dédiées aux angles très abattus. Désormais, ils se concentrent davantage sur les voiles asymétriques (Asy) conçues pour des angles plus lofés. Cela concerne les bateaux rapides qui maintiennent un angle de vent apparent faible. Par conséquent, on utilisera davantage le RANS aux temps de calcul plus courts que la DES.

L'aboutissement de cette analyse est une polaire précise du bateau. Pour créer une polaire d'un nouveau bateau avant sa mise à l'eau, le dessinateur a généralement recours à un code à panneaux ou un code RANS pour les voiles de près et un code DES pour les voiles de portant. Un exemple de code DES est Open Foam, un code open-source initialement développé par Henry Weller à l'Imperial College London en 1989.

Une fois les pressions déterminées, celles-ci doivent être à nouveau exportées dans le processus itératif de couplage aéro-élastique. Selon le même principe qu'un code RANS, un code FEA discrétise la surface modélisée en éléments – des triangles en l'occurrence –, chacun soumis aux pressions calculées par la CFD. Il en découle l'allongement et la déformation évoqués plus haut. Commence alors le couplage itératif : l'altération de la forme entraînera un changement dans les pressions modélisées par la CFD. La variation de pression provoque alors de nouveaux allongements et déformations. Ces altérations introduisent une forme différente à la CFD qui modifie les charges sur la voile. Et ainsi de suite. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les changements deviennent si insignifiants qu'un équilibre stable est atteint. Les itérations peuvent prendre de quelques minutes à plusieurs heures en fonction de la complexité des maillages CFD et FEA. Par ailleurs, plus les triangles sont petits, plus les variations d'allongement et de déformation sont précises.

Cette méthode calcule avec précision, au près comme au portant, les quatre forces aérodynamiques auxquelles on s'intéresse (force latérale, force de propulsion, moment de lacet, et moment de gite)[3]. Ces données sont ensuite introduites dans un VPP pour déterminer le delta net VMG entre ou parmi les voiles modélisées. Ce procédé paraît très simple, mais le code est intrinsèquement complexe par la multitude de variables inter-dépendantes. Une étude plus approfondie des deux chapitres consacrés à l'aérodynamique mettrait en évidence cette complexité.

Quelques codes CFD et FEA sont simplifiés pour gagner en temps de calcul. De la même manière et comme le faisaient nos premiers aérodynamiciens, certains codes VPP figent des variables afin d'en limiter la complexité. Celle-ci, par exemple, peut être considérablement réduite en neutralisant le moment de lacet, comme on l'a vu plus haut dans ce chapitre. Cette modification peut être nécessaire pour accélérer le temps de traitement ou parce que l'hydro CFD, qui modélise la coque et les appendices, a été, elle aussi, calculée de manière simpliste.

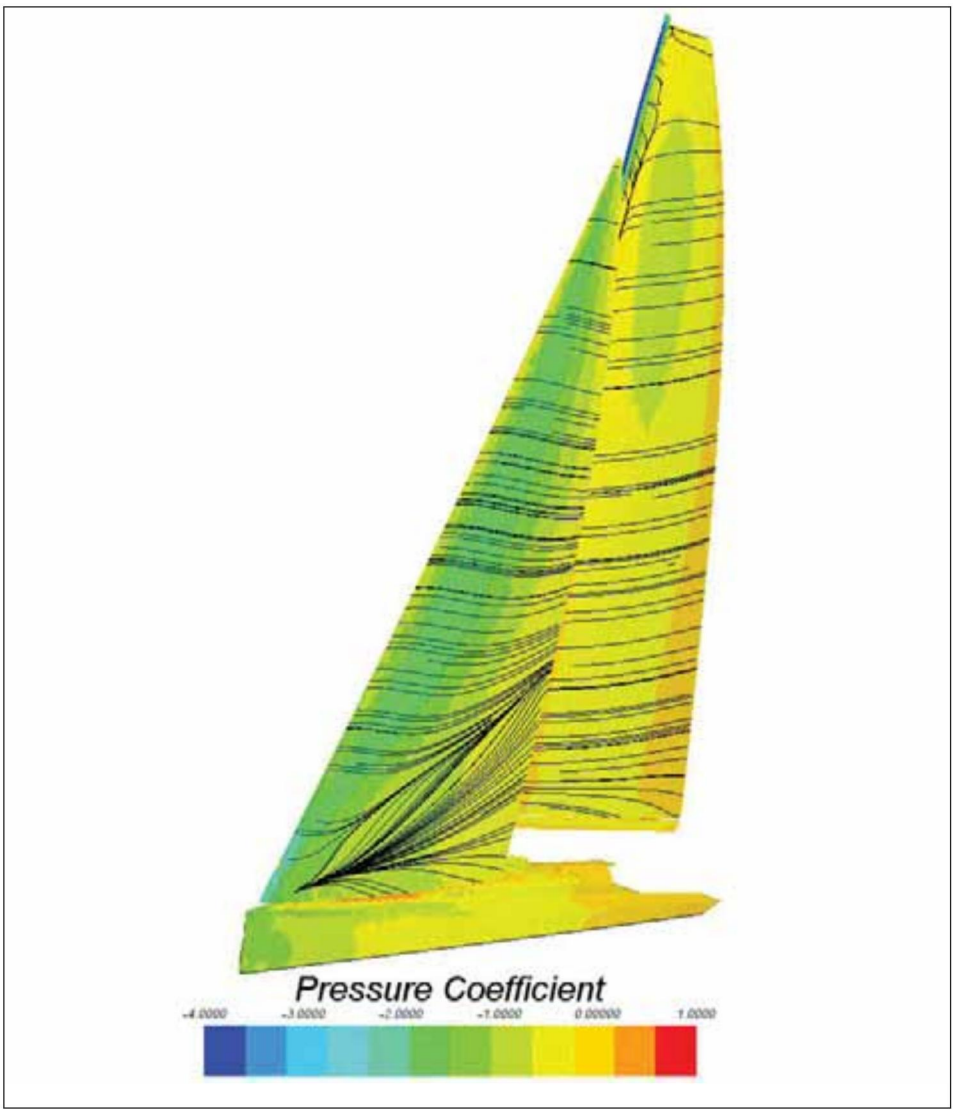
Il faut garder à l'esprit que le RANS pour les voiles de près est une simulation informatique dans un état stationnaire, et que les LES et DES sont, elles, quasi instationnaires. La modélisation dynamique à proprement parler, dans laquelle toutes les variables et tous les paramètres changent à la volée en fonction d'un changement de quelque autre variable, est extrêmement complexe. Dès lors, tout le travail décrit ci-dessus ne sert à calculer qu'un point de fonctionnement dans la polaire (à une valeur de TWS et de TWA donnée, par exemple, 12 TWS à 40 TWA). Pour compléter la polaire, les calculs doivent être effectués pour chaque vitesse de vent et pour chaque TWA. C'est pourquoi certaines polaires ne représentent que quelques vitesses de vent et supposent une linéarité entre elles. Cela nécessite beaucoup moins de temps de calcul informatique.

---

3 Nous supposons une modélisation correcte pour commencer ; cela signifie que les voiles doivent être réglées de manière réaliste.

Les simulations informatiques tendent à modéliser un monde parfait : le bateau est équilibré, la condition de Kutta est vérifiée, le barreur est irréprochable et les régleurs de voiles sont tous excellents. Comme cette description ne reflète pas la réalité, les dessinateurs veulent être en mesure de vérifier leurs résultats. Voilà pourquoi les équipes de compétition, qui peuvent se permettre le coût et la durée d'une analyse approfondie, étudient méticuleusement les formes volantes. Le dessinateur est en mesure d'évaluer la forme volante numérique par rapport à la forme volante réelle.

Des programmes tels que *Automated Sail Analysis* (ASA), développé par North, accomplissent cette fonction cruciale. Et c'est la raison pour laquelle les polaires sont mises à jour grâce à l'analyse de nombreux enregistrements de données d'instruments embarqués. Ce processus est également itératif. Une équipe de la Coupe de l'America bien financée (où généralement l'argent n'est pas un facteur limitant) sera alors mieux à même d'apprécier l'effet des changements relativement subtils sur les voiles ou leurs géométries. De telles équipes peuvent se permettre non seulement d'intégrer des appareils photos à bord pour photographier les voiles en continu et s'équiper d'instruments de mesure de haute précision, mais aussi d'embaucher des professionnels chevronnés capables d'interpréter ces données en vue d'un meilleur usage. Ils passent aussi beaucoup de temps à mesurer le vent. Une tâche triviale, semble-t-il. On pourrait croire, en effet, qu'il suffit juste de lire les relevés des instruments. Pourtant, comme l'ont montré nos discussions préalables sur le gradient et l'instabilité des flux, avoir une connaissance précise de l'écoulement du vent sur toute la hauteur des voiles, pas seulement en haut du gréement, est critique pour ces projets de haut niveau où la marge de progression est infime.



Cette image montre les pressions pour une nouvelle voile Swan 50, calculées au près, après un couplage aéro-élastique FEA/RANS CFD. Plus le nombre est négatif (zone bleue), plus la pression relative à l'écoulement libre est faible et plus le coefficient de portance (Cl) est grand. Notez que l'avant du foc, où se situe la plus grande courbure, génère les pressions les plus basses en toute logique et donc une plus grande portance. Il en va de même pour la grand-voile. Les lignes de courant représentent les directions d'écoulement calculées. Observez également le flux vertical substantiel provenant de l'amure du foc. Le flux serait moins important pour un génois à recouvrement. (North Sails, LLC.)

Les instruments pour mesurer le vent sont en tête de mâts, c'est ainsi. Cela dit, les hauteurs du mât varient entre 33 pieds (10 mètres) et 161 pieds (49 mètres), cette dernière étant la hauteur du voilier *Comanche*. Comme les gradients affectent la vitesse et la direction du vent, des instruments de mesure de vent placés à des hauteurs différentes le long du mât fourniraient des données différentes pour les mêmes conditions de vent. Les VPP et les programmes de jauge supposent généralement une vitesse de vent réel à 33 pieds (10 mètres). Par exemple, à bord de *Comanche*, le navigateur ramène les valeurs du vent à mi-chemin entre la ligne de flottaison et la tête de mât pour éviter à ses équipiers d'être déroutés par des valeurs extrêmes dans certaines conditions.

La conception numérique des voiles est sans aucun doute un sujet très technique et complexe, particulièrement difficile à expliquer et à comprendre en raison des nombreux acronymes et de la multitude de facteurs interdépendants abordés dans ce chapitre. Nul besoin de comprendre ce contexte théorique pour être un bon, voire un grand marin. Il est préférable de laisser cette tâche ardue aux dessinateurs et analystes dont c'est le quotidien. Cependant, ce chapitre doit lever le doute sur le fait que l'ère scientifique a résolument pris le pas sur la conception artisanale.

TP52
SWE
5211
TP52
ITA
280

La grand-voile

La grand-voile a toujours été la voile centrale sur un voilier, considérée comme son moteur principal. La plus ancienne preuve attestant son existence figure sur un vase de Nagada (village de Haute-Égypte) orné d'un dessin de bateau à voile égyptien, datant de l'an 3200 avant J.-C. (soit près de 5000 ans) et découvert en amont du Nil.

Les matériaux, le gréement et la manipulation des voiles ont radicalement changé depuis ce premier bateau de travail égyptien. Pourtant, l'importance de la grand-voile en termes de vitesse et de performance n'a nullement faibli. Même les nombreux changements dans les règles de jauge qui visaient à réduire ses effets bénéfiques n'ont eu aucune répercussion sur son statut. En fait, dès lors que les architectes navals et les dessinateurs de voiles, grâce à leurs outils d'analyse avancés, ont saisi les raisons de l'efficacité de la grand-voile, sa contribution au mètre carré de surface de voile n'a cessé d'augmenter. Désormais, nous comprenons le rôle essentiel de cette voile, à savoir diriger le bateau et améliorer les performances du foc qui, utilisé seul, n'est pas si efficient.

La grand-voile est une voile à part. Ses performances doivent être homogènes dans toutes les conditions météo, du calme plat à la tempête, et à tous les angles de vent possibles. La raison est simple : contrairement à un foc ou à une voile de portant, il est très difficile de la changer en cours de navigation.

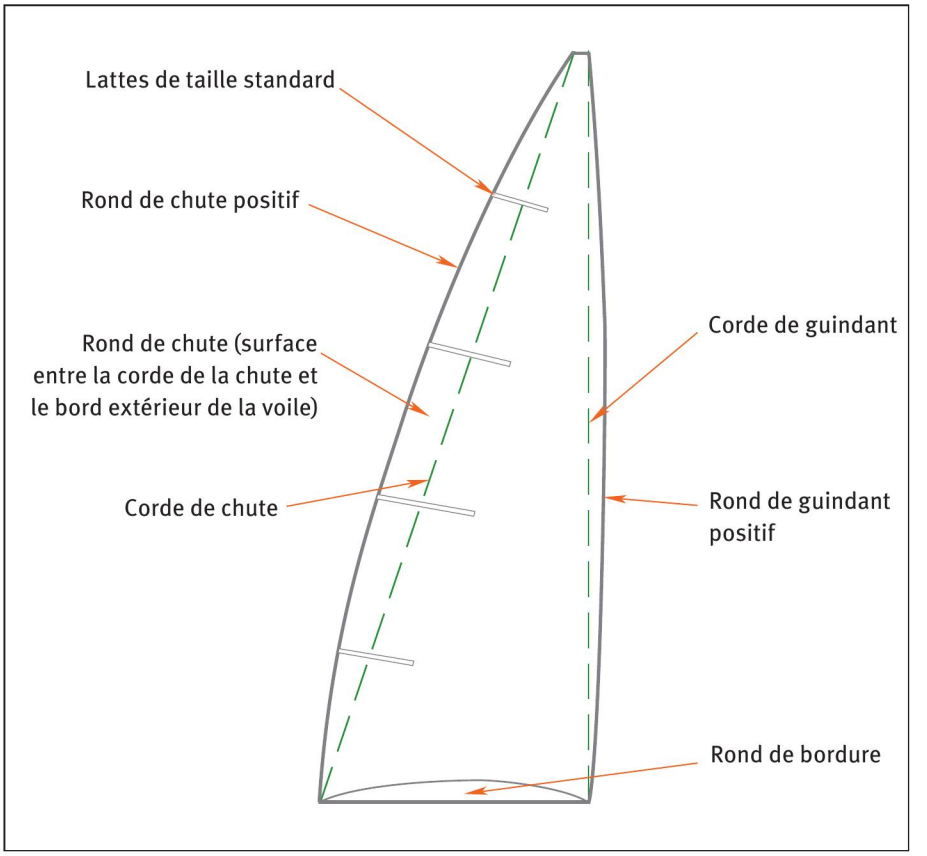


Figure 7.1 Anatomie de base d'une voile

Comme souligné dans les chapitres 7 et 8, les focs et les voiles de portant revêtent de nombreuses formes et tailles différentes pour couvrir une large plage de conditions. La grand-voile n'a pas ce privilège. La figure 7.1 illustre une anatomie de base d'une grand-voile. Ce schéma illustre une grand-voile lattée standard avec une têtière classique. De nombreuses grands-voiles, en particulier pour la croisière, sont entièrement lattées du guindant à la chute. La plupart des grands-voiles de course utilisent à la fois des lattes pleines et des lattes courtes. Le surplus de poids occasionné par les lattes de pleine longueur est bien souvent compensé par les nombreuses fonctions qu'elles remplissent. La première consiste à améliorer la durabilité de la grand-voile en réduisant les battements. Une autre fonction est de faciliter la tâche du régleur de grands-voiles, car la forme des sections horizontales est plus facile à visualiser. Aussi, l'utilisation des lattes permet au dessinateur d'ajouter du rond de chute positif sur la plupart des grands-voiles, et seulement sur certains focs. Pour comprendre ce point, il faut revoir les chapitres consacrés à l'aérodynamique. En fait, plus on s'éloigne de la traînée de forme du mât et de la traînée induite au niveau de la chute du foc, plus la surface de grand-voile est efficace.

En face, *Rán* (à gauche) et *Azzurra*, deux TP 52 participant à la Key West Race Week en 2014. Avec des équipages expérimentés, les voiles 3Di sont parfaitement bordées (la différence de couleur est uniquement liée aux différents pigments de couleur dans l'adhésif). Notez la similitude des creux au niveau des bandes de visu. On observe aussi que les voiles d'avant sont très rentrées par rapport aux barres de flèche. (Photo North Sails, LLC.)

Le départ de la Rolex Fastnet en 2013 (régate bisannuelle). La flotte quitte le Solent en Angleterre. Notez la taille des grands-voiles par rapport aux voiles d'avant. Une raison majeure pour expliquer cette différence est que le réglage de la grand-voile a un impact plus important sur la performance d'un bateau que celui de la voile d'avant. (Photo Rolex/Kurt Arrigo.)

Toutes les grands-voiles possèdent également un rond de guindant : surface supplémentaire au-delà de la corde du guindant derrière un mât. À noter que plus le mât est souple, plus le dessinateur ajoutera du rond de guindant. Le concept du rond de guindant et du cintre du mât est exactement l'inverse de l'interaction d'un foc avec le dévers d'étai. En raison du rond de chute, du rond de guindant et du rond de bordure, la surface de la grand-voile est nettement supérieure à celle de son triangle de base. Typiquement, une grand-voile de course d'aujourd'hui est 40 pour cent plus grande que son triangle de base[1].

Un autre facteur dans la conception de la voile et de la sélection du tissu est l'allongement (AR). Défini comme P (longueur du guindant)/E (longueur de la bordure), l'allongement (AR) joue un rôle clé dans l'aérodynamique et la stabilité de la voile. D'un point de vue aérodynamique, une voile de très faible allongement générera plus de traînée induite par mètre carré qu'une grand-voile de fort allongement avec un ratio autour de 2,5. Rappelons que sur le haut de la voile, le delta de pression cherche à s'équilibrer. Là-haut, le flux d'air cherche à passer du côté au vent vers le côté sous le vent, des hautes pressions vers les basses pressions. Le chemin le plus rapide est par-dessus la voile, comme à l'extrémité d'une aile d'avion. D'ailleurs, les concepteurs d'ailes ajoutent des ailettes en bout d'aile pour minimiser ce phénomène. Comme nous le verrons ci-dessous, c'est aussi l'une des raisons

1 Les maîtres-voiliers définissent généralement l'allongement (AR) par cette formule simple : P/E. Une mesure plus précise, utilisée dans l'aérodynamique des ailes d'avions, est :

$$\frac{\text{surface de l'aile}}{\text{envergure de la voile}^2}$$

La seconde formule tient compte de la longueur variable de corde. La surface 3D d'une grand-voile comprend le rond de chute, le rond de bordure, le rond de guindant, et la courbure liée à la forme de la voile.

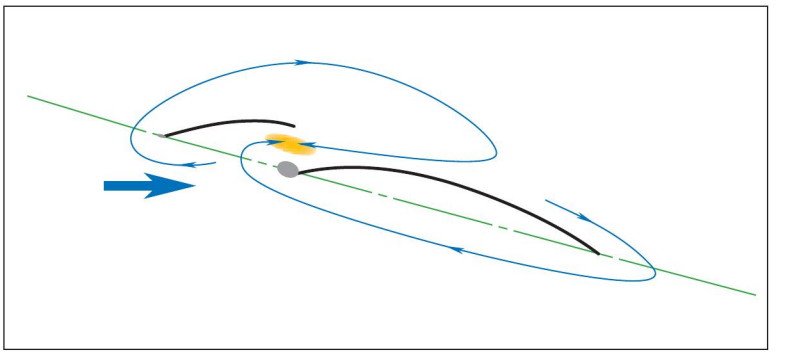


Figure 7.2 Le flux de circulation se retrouve dans la fente, ce qui ralentit l'écoulement sous le vent de la grand-voile.

pour lesquelles la grand-voile à corne est si populaire sur les bateaux de course modernes. Pour une surface de voile donnée, un AR plus élevé est préférable pour le petit temps (vitesse de vent plus élevée en altitude), mais défavorable par gros temps (plus de force de gîte). Un plan de voilure à l'AR élevé diminue également l'angle du gréement dormant, augmentant ainsi la charge sur l'ensemble du gréement. Pour permettre ainsi à votre grand-voile d'atteindre un écoulement de vent plus fort, il est nécessaire d'avoir à la fois un mât et un gréement plus résistants et un bateau structurellement plus raide ! Une grand-voile à l'AR élevé possède une chute plus longue pour une surface de voile donnée ; cela signifie des charges plus élevées sur le point d'écoute et le point de drisse, et par conséquent une élongation plus importante. Comme nous allons voir ci-dessous, l'élongation est plus pénalisante pour une grand-voile que pour un foc. Aussi, pour ajouter à cette complexité, plus l'AR est élevé, plus la grand-voile est affectée par la traînée de forme : la turbulence du mât. Aujourd'hui, la plupart des bateaux de course high-tech ont en moyenne un AR de 3,1 ; alors que la plupart des bateaux de croisière se rapprochent des 2,8. Mais tous les bateaux ou classes ne suivent pas ces critères : l'AR d'un Volvo 65 est de 3,4 ; l'AR pour un TP 52 est de 2,8. Les avantages et inconvénients sont contradictoires, et il n'existe pas d'AR optimal pour les grands-voiles de course. Cependant, d'après ce que nous avons appris ci-dessus, on comprend mieux pourquoi les bateaux de croisière ont tendance à avoir des grands-voiles de faible allongement.

À présent, observons le rond de chute de plus près. Plus le rond de chute est important, plus la surface éloignée de la traînée de forme du mât et du gréement est grande. De plus, un rond de chute plus important en haut renforce l'effet elliptique qui a si bien fonctionné sur les avions Spitfire de la Seconde Guerre mondiale, modèle de référence pour les ailes d'avion depuis. Le rond de chute est généralement limité par la jauge, notamment dans le but de réduire les coûts pour les propriétaires. De toute évidence, les jaugeurs ont supposé que l'augmentation du rond de chute est très efficace (dans une certaine limite). La théorie de l'aérodynamique leur donne raison. C'est pourquoi les marins et les voileries soucieux de la performance sont peu enclins aux grands-voiles sur enrouleur. Certes, ces grands-voiles peuvent être plus faciles à manipuler. Mais parce que le rond de chute doit être quasi inexistant, la grand-voile est beaucoup moins efficace par mètre carré. Sans compter que la section du mât doit être plus grande pour caréner la voile sur enrouleur.

Pour comprendre l'importance relative de la grand-voile, il faut se remémorer quelques principes sur l'aérodynamique et la théorie de la circulation. Rappelons que le foc et la grand-voile ont leur propre circulation. Les deux flux de directions opposées se rencontrent sous le vent de la grand-voile et se ralentissent mutuellement (voir figure 7.2). En outre, étant donné que la grand-voile est positionnée au vent du foc, elle perçoit le flux en premier. Ce dernier est alors contraint de dévier sous le vent avant d'atteindre le foc, permettant à celui-ci de naviguer dans une adonnante relative. Dans ce cas, la déviation (*upwash*) n'opère pas vers le haut mais au vent. La position du foc est analogue à une position de défense sous le vent des voiliers lors d'une régate. En effet, le bateau sous le vent bénéficie d'une adonnante relative créée par le bateau au vent tout comme les focs bénéficient de leur positionnement par rapport à la grand-voile. Toutes choses étant égales par ailleurs, le bateau se trouvant en position de défense sous le vent d'un autre sera en mesure de pointer plus haut qu'un troisième bateau qui n'a pas de bateau à son vent, tout simplement parce qu'il navigue dans une adonnante relative. C'est l'une des raisons pour lesquelles 1 + 1 >= 2. La portance totale créée par l'interaction de la grand-voile et du foc est supérieure à la somme des portances de ces mêmes voiles agissant seules.

La grand-voile bénéficie également au foc en provoquant un delta de vitesse d'écoulement entre l'extrados (basse pression) et l'intrados (haute pression) de la voile. De la même manière, le foc bénéficie à la grand-voile. Ce n'est donc pas unilatéral. Compte tenu de la position du foc, le régleur de grands-voiles n'a pas d'autre choix que de border cette dernière à un angle plus serré que le foc à l'aide de l'écoute de grand-voile ou

L'interaction entre la voile d'avant et la grand-voile est similaire à l'interaction entre le bateau situé en position de défense sous le vent et le bateau au vent, mais se situant en retrait (fig. 4.2 page 70). Il s'agit d'*Antix* lors de la régate internationale bicentenniale du Royal Yacht Squadron de 2015. (Photo Ian Roman/North Sails, LLC.)

du chariot ou les deux à la fois. La grand-voile doit donc tolérer un angle d'attaque légèrement plus élevé. En tant que telle, elle est plus susceptible de décrocher que le foc (avec davantage de tourbillons au niveau de la chute). Par conséquent, il est essentiel que l'écoulement sous le vent soit ralenti près de la chute pour réduire ce qui serait un changement radical entre l'extrados de la grand-voile soumis à des basses pressions et l'intrados exposé à de hautes pressions (faibles vitesses) sur la chute.

Au-delà de l'effet positif de la grand-voile sur le foc, sa contribution dans l'équilibre de barre ne peut pas être sous-estimée. Nous nous attarderons ultérieurement sur ce sujet. Observons d'abord ce que le dessinateur de voiles à terre et le régleur de voiles à bord peuvent accomplir respectivement pour maximiser les performances de la grand-voile. Le rôle de ces deux personnes est primordial. Pour apprécier leur importance respective, nous devons comprendre les concepts qui régissent la forme d'une grand-voile.

Définir la forme de la grand-voile

Le paramètre de base de la forme d'une grand-voile est son creux. Il est défini, d'une part, par la profondeur maximale relative à la corde et, d'autre part, par la position de cette profondeur maximale le long de la corde. Ces caractéristiques sont toujours mesurées et perçues latéralement par le régleur (voir figure 7.3). Sans vouloir trop généraliser, la position du creux d'une grand-voile ne varie que légèrement, tandis que la profondeur de creux change assez radicalement en fonction des conditions variées que la grand-voile doit couvrir. La profondeur de creux peut varier considérablement selon le type et la taille du bateau. Imaginez que vous observez la position de creux à mi-hauteur de la grand-voile. En règle générale, la position de creux de la grand-voile sera plus reculée que celle d'un foc typique, environ 48 à 50 pour cent. Sa profondeur de creux peut varier de 7 à peut-être 13 pour cent. Aucun foc n'est conçu pour être capable de couvrir une telle variation. Bien qu'il y ait un creux spécifique conçu sur une grand-voile, sa profondeur réelle et sa position dépendent davantage des réglages, comme nous le verrons ci-dessous. La répartition verticale de ce creux est bien plus critique que quelques pourcentages de la position de creux ou de 1 ou 2 pour cent de la profondeur.

Figure 7.3 Le creux maximal et sa position se trouvent à un point situé à cinq lignes verticales du guindant. Même si, dans ce chapitre consacré à la grand-voile, on présente un schéma de voile d'avant, la position du creux et la profondeur sont calculés de la même façon. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

Nous avons appris dans les chapitres consacrés à l'aérodynamique que les grands-voiles, comme les génois, ont généralement des sections légèrement plus profondes de bas en haut (le creux augmente de bas en haut). Une section plus profonde en tête qu'au pied de la voile exploite au mieux l'effet de gradient sur la direction et la vitesse du vent ; en d'autres termes, on cherche à obtenir une forme elliptique sur la partie haute la plus creuse. Une telle forme minimise les tourbillons marginaux, le flux d'air essayant de trouver le chemin le plus court de l'intrados (haute pression) vers l'extrados (basse pression). Presque toutes les grands-voiles de course sur les bateaux de compétition ont une corne, principalement pour gagner en surface au portant. Et dans une moindre mesure, cette configuration est également bénéfique au près. Fait intéressant, les grands-voiles, en particulier celles sur les bateaux au gréement fractionné, nécessitent un plus grand delta de profondeur de creux de bas en haut que les génois. Une révision rapide des chapitres sur l'aérodynamique fournit un indice : la partie supérieure de la grand-voile est beaucoup moins influencée par la voile d'avant. En effet, cette partie haute de la grand-voile se situe dans l'écoulement libre et bénéficie ainsi d'angles de vent

plus ouverts, ce qui implique un vrillage plus élevé. Il demeure que ce vrillage reste limité car cette partie au sommet de la grand-voile est dépendante de la partie basse. Pour éviter le décrochage à l'avant de cette partie supérieure et pour supporter la surface supplémentaire de la têtière, le dessinateur de voiles doit ajouter du volume. Presque tous les bateaux de course modernes sont équipés d'un gréement fractionné qui permet à la partie supérieure du foc de bénéficier de la grand-voile. En effet, au capelage, la corde de la grand-voile sur un gréement fractionné est encore relativement longue et donc contribue à éliminer les tourbillons marginaux du foc. Sur un gréement en tête, les tourbillons à l'extrémité du foc coïncident avec les tourbillons à l'extrémité de la grand-voile. Ce scénario n'est pas idéal !

La chute : un élément clé

L'optimisation de la vitesse au près passe par une maîtrise du vrillage de la grand-voile : la forme verticale de la chute. On dit que la seule raison d'avoir une partie avant sur une grand-voile, c'est pour lier la chute au mât ! Dans le chapitre sur les voiles d'avant, nous verrons qu'au près sur la plupart des bateaux, le régleur de foc est limité ou guidé par la position des barres de flèche. Pour la chute de la grand-voile, seuls les penons peuvent faire office de référence. Le rôle du régleur n'est pas seulement de veiller à ce que l'air dévié à l'avant de la grand-voile quitte la grand-voile sur la chute avec le moins d'interférence possible (traînée induite), mais également de contribuer à diriger le bateau. Pour ces deux raisons, le réglage de la grand-voile a plus d'impact sur la performance d'un bateau que la voile d'avant. Alors, comment le régleur devrait-il ajuster la chute au près pour atteindre au mieux les deux objectifs ci-dessus ? Avec une grand-voile bien conçue et relativement neuve, la solution est de la border jusqu'à ce que le penon supérieur (de préférence accroché à l'arrière de la latte supérieure) commence juste à se décrocher. S'il se décroche constamment (caché sous le vent), c'est un signe que la traînée est trop élevée. Le rapport portance/traînée diminue. Si le penon vole horizontalement ou vient légèrement au vent, c'est que la voile peut être davantage bordée pour permettre au bateau de naviguer plus près du vent. Dans ce cas, le rapport portance/traînée est réduit pour la raison inverse. Cependant, pour comprendre la dynamique ici, nous devons nous intéresser à la fonction d'équilibre. Chaque voilier possède deux points d'équilibre appelés centres d'effort (CE). Le CE hydro est sous l'eau ; le CE aéro est au-dessus de l'eau. Le CE hydro, parfois appelé centre de résistance latérale ou CLR, est influencé principalement par la taille et la position de la quille et du safran, ainsi que par la forme de la carène sous la ligne de flottaison (voir figure 4.5, page 74)[2].

L'équilibre aérodynamique dépend du plan de voilure, de sa position longitudinale sur le bateau, des tailles des voiles, de leur allongement et même de leur forme. Un des objectifs de l'architecte naval est de déterminer l'équilibre optimal de ces deux CE avant la mise à l'eau, si possible avant la construction. Déplacer un mât, une quille, ou un safran, n'est pas une opération anodine bien que de nombreux projets de compétition aient été contraints de s'y résoudre. C'est une autre raison pour laquelle la simulation numérique est essentielle. North Sails a été ainsi sollicitée pour collaborer avec les architectes navals dans les phases initiales du processus de conception de la plupart des bateaux de course high-tech. Les concepteurs de yachts disposent d'un savoir-faire et de bons outils afin de prédire le CE sous l'eau, mais ils font couramment appel aux dessinateurs de voile pour une analyse précise du CE aéro. Un indicateur de l'équilibre des deux centres d'effort est l'angle de barre (voir photo ci-contre). L'angle de barre est le paramètre pour compenser le moment de lacet :

Notez l'angle de la barre franche positionné quelques degrés au vent, ce qui signifie que le CE est légèrement derrière le CLR, comme cela devrait l'être dans ces conditions de vent médium sur un Farr 40 (voir fig. 4.5 page 74). (Photo North Sails, LLC.)

2 En règle générale, on fait référence à ces éléments de coque, tout comme pour le plan de voilure, en tant que plan de formes.

Ce Swan 42, que l'on voit dans les affres d'un classique départ au tas, est victime d'un scénario catastrophe résultant d'un déséquilibre entre les forces sur la quille et le safran et celles sur le plan de voilure. (Photo Dan Nerney/Rolex.)

la tendance d'un bateau à pivoter autour de son axe vertical. Selon le type de bateau, un angle de safran de 3 à 5 degrés au vent est optimal. Dans ce cas, on obtiendrait un bateau ardent. La raison est qu'avec un safran tourné au vent, le rapport portance/traînée du safran augmente. Cette action est nécessaire pour contrer la tendance naturelle et souhaitable du voilier à se rapprocher de l'axe du vent pour permettre ensuite au bateau de naviguer sur son cap[3]. C'est pourquoi un régleur de grands-voiles recommandera souvent à un barreur moins expérimenté de « ne jamais lofer ». Mais un régleur expérimenté n'aura pas à le faire car il gèrera en grande partie la direction du bateau.

Comment ça marche ?

Supposons que le voilier navigue au près dans 12 nœuds de vitesse de vent réel (TWS) avec un angle de safran idéal de 3 degrés au vent. Soudain survient une risée de 15 TWS, sans aucun changement de direction de vent réel (TWD). On appelle ce phénomène une adonnante. Comme étudié dans les chapitres sur l'aérodynamique, il en résulte une augmentation des charges sur les voiles, entraînant une gîte et une vitesse accrues[4]. Parce que la TWS augmente, l'angle du vent apparent (AWA) augmente. Parce que l'augmentation de l'AWA est immédiate, la grand-voile sera automatiquement surbordée. Comme l'effet de gîte commence à se faire sentir, le barreur n'a pas d'autre choix que d'abattre, ce qui augmente l'angle de barre au-delà de son optimum. Il en découle une diminution du rapport portance/traînée au-dessus comme en dessous de la ligne de flottaison. Maintenant, imaginez le contraire. Une molle avec une TWD constante contraint le bateau à se redresser, ce qui signifie qu'il tend à s'éloigner du vent. Ici, l'AWA diminue brusquement, entraînant à la fois le dévent de la grand-voile et du foc. On parle alors d'un angle d'incidence trop faible. Rappelons que lorsque cela se produit sur un avion, la portance diminue et la traînée augmente. L'avion pourrait alors chuter. Un bateau ralentit. Dans les deux cas, c'est parce que la portance a diminué proportionnellement à la traînée. Dans ce cas, le barreur doit lofer. Le meilleur des scénarios est un angle de barre plus petit et un rapport portance/traînée plus faible. Le pire scénario est d'avoir le safran braqué sous le vent. Le bateau ne sera plus équilibré avec pour conséquence directe une perte de VMG causée par une dérive qui augmente et une portance du plan de voilure et du safran plus faible. Mais tout rentre dans l'ordre grâce au réglage de la grand-voile : le régleur utilise alors la chute de la grand-voile comme « safran principal ». Dans le premier cas, si le régleur anticipe la risée, l'écoute ou le chariot de grand-voile ou les deux à la fois seront choqués. La chute vrillera ; la gîte restera constante ; et le voilier maintiendra son équilibre. Dans l'accalmie, la chute sera bordée, ce qui fait reculer le CE aérodynamique, et induit un moment de lacet au vent. Dans ces conditions, le régleur de grands-voiles se substitue en quelque sorte au barreur. En résumé, si le régleur de grands-voiles règle bien la voile au près, le barreur n'aura pas à barrer. Du moins, c'est le but. À la lueur de cette explication, on comprend mieux

3 Parce que le safran est tourné au vent, la dérive est réduite. Et parce que le flux situé directement en amont du safran est dévié, une portance est créée.

4 Moins les voiles se déforment (y compris gréement et coque), plus les charges sont transférées au bateau.

maintenant pourquoi la maîtrise de la chute s'impose de loin sur toute autre forme de contrôle de voile.

Les deux commandes les moins importantes sont le cunningham et la bordure. Le cunningham, exerçant une tension sur le guindant de la grand-voile, est principalement utilisé pour éliminer les plis, étant donné les matériaux à faible élongation utilisés généralement aujourd'hui. La bordure sur la plupart des bateaux de course est à son seuil maximal dès 12 TWS environ dans le but de minimiser la traînée de forme. Ce volume supplémentaire est nécessaire seulement dans le petit temps au près et pour toutes les autres allures dans la mesure où la gîte n'est pas encore un facteur limitant. La hauteur du chariot est un paramètre de contrôle plus important parce qu'il permet au régleur de positionner la chute dans son ensemble en position optimale avec un vrillage donné. Notez que le chariot n'affecte pas la forme de la chute. C'est l'écoute qui contrôle directement cette dernière et qui affecte également le cintre du mât (fig. 7.4). Cependant, un chariot transversal rectiligne va entraîner à ses extrémités la bôme vers le bas. Voilà pourquoi certains chariots devraient être courbes. Dans des conditions de vent léger à médium avec une TWS de 6 à 12, et en particulier sur un plan d'eau plat, la bôme sur la plupart des voiliers de course modernes devrait être positionnée légèrement au vent de l'axe du bateau afin de reculer le CE aérodynamique encore un peu et de mettre plus de pression sur le safran. Le but étant de créer un angle de barre optimal. Tant que le bateau n'est pas en surpuissance, la bôme devrait rester dans l'axe du bateau. Dans le gros temps, certains régleurs positionnent le chariot au centre et ajustent l'écoute, tandis que d'autres fixent l'écoute et ajustent le chariot. Typiquement, la seconde méthode est favorable, seulement parce qu'elle est plus réactive. Dans le gros temps au près, quelques régleurs utilisent un halebas de bôme – en général utilisé uniquement au portant – pour à la fois cintrer le bas du mât, aplatir la voile et éviter un trop grand vrillage de la chute lorsque l'écoute est choquée dans les risées. Et dans le vent très fort, les régleurs expérimentés laissent la moitié avant de la grand-voile déventer en ne gardant que la partie près de la chute établie. Cette technique fonctionne comme un safran et ne crée pas beaucoup de portance ; c'est le rôle principal de la grand-voile dans ces conditions.

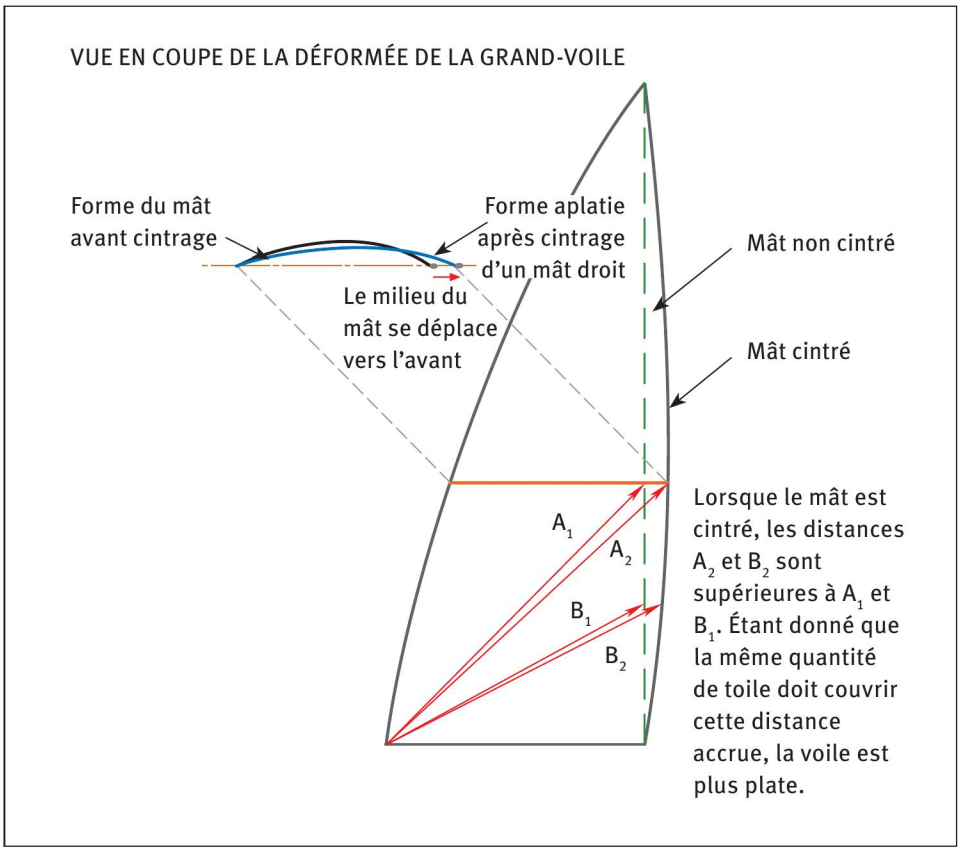


Figure 7.4 Comment le cintre du mât affecte-t-il la forme de la grand-voile ?

Le réglage au largue et au portant est relativement facile. Il suffit de choquer l'écoute jusqu'à ce que le bord d'attaque dévente et de la reborder légèrement. Mieux vaut avoir un cunningham et une bordure choqués tant que le bateau n'est pas en surpuissance. En dehors de la tension de l'écoute, ce qui est critique au portant, en particulier en mode VMG, c'est la tension du halebas. Tous les marins qui ont régaté sur des monotypes le savent. Avec trop de halebas, la traînée induite devient le facteur dominant en raison d'une chute trop tendue. Avec une tension de halebas trop faible, et donc un vrillage trop important, on réduit la puissance. La quantité de vrillage requise est avant tout une fonction de l'AWA. Par conséquent, le halebas doit être ajusté presque autant que l'écoute dans des conditions variables.

Réglage du gréement et contrôle de la grand-voile

Enfin, le dernier élément, mais non des moindres, est le réglage du gréement qui commence au ponton, parfois appelé docktune[5]. Le réglage à terre inclut les éléments suivants :

1. La quête ; seule la longueur de l'étai détermine la quête.
2. Le pré-cintre : la différence d'alignement entre le pied de mât et la position de l'étambrai (niveau du pont) et la tension des haubans.
3. La tension des haubans.

Plus la quête est importante, plus le CE aérodynamique se déplace vers l'arrière. Donc la quête est avant tout un outil de contrôle de l'équilibre de barre. Signalons un petit détail : le concepteur de voiles positionne la hauteur d'écoute des génois en supposant une quantité X de quête. Trop de quête pourrait compromettre la capacité de border la voile. Gardez à l'esprit que la quête affecte le pré-cintre ; c'est-à-dire que pour une position de pied de mât et d'étambrai donnée, plus on a de quête, plus le pré-cintre est important. Cela signifie qu'à charge de pataras équivalente, le mât cintre plus et absorbe plus de rond de guindant. Par conséquent, pour le régleur, le pré-cintre combiné à la tension de pataras constituent les contrôles principaux de profondeur et de position de creux de la grand-voile. Plus le cintre du mât est important, plus la voile s'aplatit et plus le creux maximal recule. En fonction de la résistance à l'allongement du tissu, le cunningham peut contribuer à avancer le creux maximal. La tension des haubans est un autre moyen de contrôle du pré-cintre. Plus la tension globale des haubans est importante, plus le mât sera rigide pour une tension de pataras donnée ou une tension de chute exercée par l'écoute[6]. En résumé, la combinaison de ces trois facteurs affecte la capacité de cintrer du gréement sous une tension X du pataras et une tension Y d'écoute. Voilà pourquoi les bateaux de compétition sont dotés de réglages faciles pour contrôler la tension du gréement et des haubans. La tension relative des haubans est critique. Elle doit être symétrique à condition que les barres de flèche soient positionnées symétriquement. Plus important encore, la tension relative des haubans de bas en haut doit être appliquée de telle façon que le mât puisse cintrer (une fois que le pataras est mis sous tension) conformément aux souhaits du dessinateur de voiles. Autrement dit, la quantité et la distribution du rond de guindant doivent correspondre au cintre du mât. Nous aborderons ce point plus loin. Maintenant, revenons au dessinateur de voiles.

La conception de la grand-voile

Dans les termes les plus simples, un dessinateur de voiles doit équilibrer le rond de guindant avec le volume de la voile. Créer du volume uniquement avec le rond de guindant donnerait lieu à un creux très avancé et à des arrières trop tendus[7]. Presque toutes les grands-voiles sont mises en forme par combinaison des deux : rond de guindant et pinces. Souvenez-vous du commentaire ironique évoqué plus haut à savoir que la seule fonction de la partie avant de la grand-voile est de relier l'arrière de la voile au mât. Ainsi, les dessinateurs de voiles, tout comme les régleurs, focalisent leur attention conformément à cet adage : alors que la profondeur et la position du creux doivent correspondre au type de bateau, l'objectif principal est d'obtenir une position optimale de la chute dans l'espace. Cela ne se résume pas simplement à définir l'angle de sortie (l'angle selon lequel le flux d'air quitte la chute), mais également à donner un

En face, le super-maxi *Comanche* de 100 pieds, propriété de Jim Clark et Kristy Hinze-Clark, et skippé par le président de North Sails Ken Read lors de la Rolex Sydney Hobart de 2014. VPLP et Verdier Yacht Design en partenariat avec Southern Spars et Design Services North Sails ont respectivement conçu la coque, le mât et les voiles. (Photo Daniel Forster/ Rolex.)

5 Nous supposons d'emblée que le dessinateur de voiles a fait correspondre harmonieusement le rond de guindant au cintre du mât, et que le dessinateur de voiles ou l'architecte naval contribue à l'élaboration du dock tune. Les guides de réglage sont utiles à cet égard.

6 Parfois, la tension d'écoute peut avoir plus d'impact que celle du pataras, en particulier avec des matériaux à faible allongement comme le 3Di. En outre, la tension des haubans a un impact plus sensible sur le cintre du mât d'un gréement à barres de flèche poussantes.

7 Le terme *pince* a été utilisé pour décrire la mise en forme autre que le rond de guindant. Cependant, depuis, le 3DL et le 3Di ont permis une mise en forme dans toutes les parties des voiles, et pas seulement avec les pinces au niveau des laizes. *Mise en forme* est l'expression le plus souvent utilisée aujourd'hui.

Mirpuri
wildlife
conservancy

profil optimal à la chute. Il ne suffit pas d'atteindre le delta de twist total souhaité (qui peut atteindre 25 degrés), c'est-à-dire la différence entre l'angle de sortie au niveau de la bande de visualisation inférieure par rapport au sommet de la voile. Un vrillage linéaire est tout aussi important (voir fig. 7.5, page 130). Par exemple, un dessin de grand-voile avec une différence de vrillage nettement plus importante entre la bande inférieure et la bande médiane qu'entre la bande du milieu et la bande supérieure sera peu performant. Si votre grand-voile présente cette fâcheuse caractéristique, le haut de la chute est alors fermé par rapport au milieu, ce qui contraint le régleur à choquer excessivement l'écoute uniquement pour empêcher le penon du haut de décrocher. Le résultat est un angle d'incidence plus faible que l'optimal : vous perdez en cap. En outre, vous déventerez certainement plus le guindant, ce qui n'est pas nécessairement une mauvaise chose. Cependant, trop de dévent sur le guindant signifie simplement que l'écoute est trop choquée par rapport au cap imposé par le barreur ou en raison d'un mauvais réglage d'écoute de la voile d'avant.

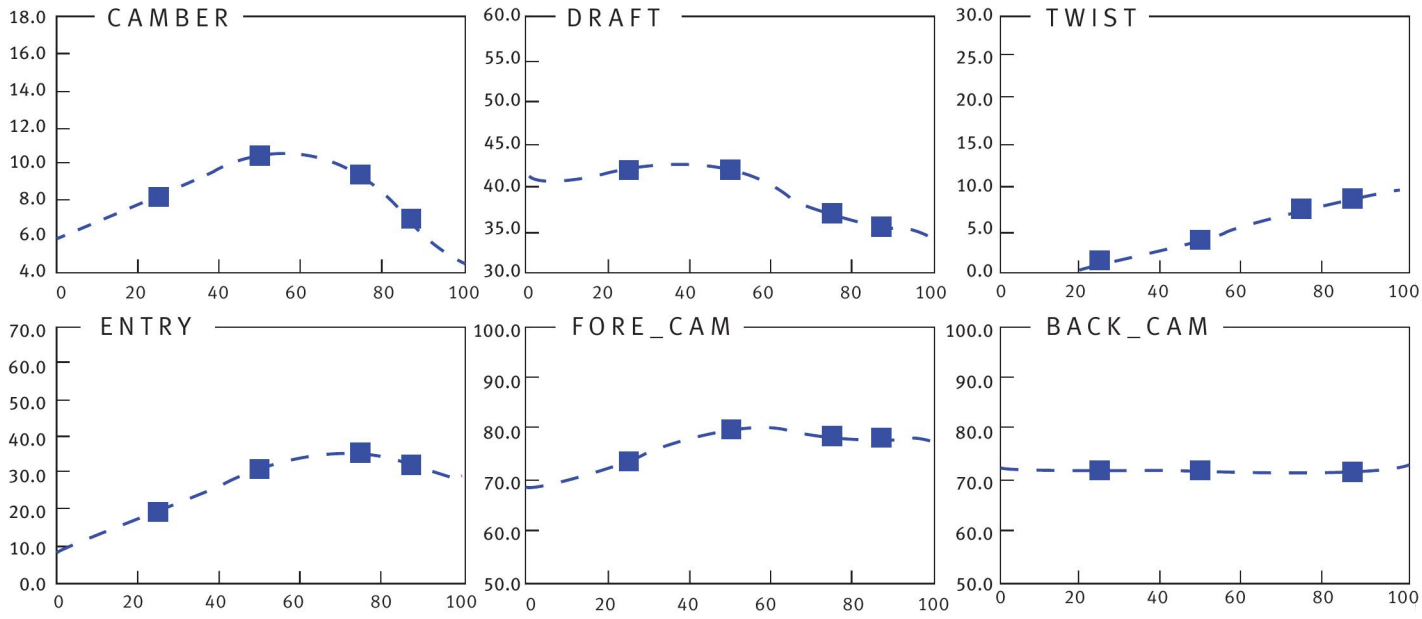
Alors, comment traite-t-on ces problématiques contradictoires mais interdépendantes dans la phase de conception ? Voici, par exemple, comment procéderait de nos jours un dessinateur de voiles pour un nouveau bateau. La première étape est de comprendre les propriétés du matériau. À taille équivalente, la conception d'une grand-voile en Dacron doit être très différente de celle d'une grand-voile 3Di. La résistance à l'allongement doit être prise en compte. Pour les voiles de compétition de très haut niveau comme pour la Coupe de l'America et la Volvo Ocean Race, le client a les moyens de financer une analyse approfondie dont la modélisation de l'impact de différents matériaux sur des formes variées. Du point de vue 3Di, le dessinateur de North modéliserait différentes « structures ». Autrement dit, il modéliserait différents alignements de bandes 3Di afin de déterminer l'orientation optimale. Cette étape permet de maîtriser les allongements pour fournir la plus large gamme d'ajustements et couvrir une plage de vent étendue. Par exemple, un tissu non extensible pourrait être efficace dans une plage étroite. Cependant, il ne serait pas avantageux dans une TWS de 3 à 23 (voir le chapitre 5 pour une étude des voiles 3DL et 3Di). Étant donné l'expérience acquise dans le design des voiles, les dessinateurs commenceraient le processus de conception proprement dit en se basant sur un dessin existant similaire. Avec un logiciel de CAO, il est facile d'apporter des modifications. Ensuite, la quantité et la distribution du rond de guindant doivent être adaptées au cintre du mât. L'objectif dans le gros temps est d'avoir une voile uniformément aplatie : en cintrant le mât pour absorber tout le rond de guindant voire légèrement plus. Il est évident que le dessinateur doit appréhender la variation du cintre du mât et apprécier le bon réglage du mât pour atteindre cet objectif.

Au cours des dix dernières années, des progrès importants ont été réalisés dans la construction de mâts et gréements plus raides[8]. En conséquence, pour une taille et un type de bateau donnés, les ronds de guindant au fil des ans ont diminué ; en fait, de plus de 40 pour cent dans certains cas. Cela soulève un point intéressant. Pourquoi un architecte naval ou un dessinateur n'opte-t-il pas pour une surface de voile accrue via un rond de guindant important ? Une fois de plus, c'est grâce à notre compréhension de l'aérodynamique qu'on trouve des éléments de réponse. La jauge détermine la plupart du temps la forme en plan de la grand-voile. Entre placer cette surface juste derrière le mât et sa traînée de forme, et la placer sur la chute, le choix est évident. C'est particulièrement vrai au largue et en mode « VMG » portant où avec un gréement droit, tout l'excès de rond de guindant se trouve juste derrière le mât. Pourquoi ne pas alors avoir un gréement droit qui ne cintre pas ? Grâce aux explications précédentes, nous savons pourquoi. Le régleur de grands-voiles a besoin d'une palette variée de réglages pour être en mesure d'équilibrer efficacement le bateau. Ensuite, il faut décider du volume général, c'est-à-dire déterminer la bonne mise en forme. La forme est mesurée de deux façons : la quantité

8 Les deux entreprises North Sails et Southern Spars appartiennent à North Technology Group (NTG). Ce partenariat permet aux dessinateurs de North Sails de se mettre constamment au diapason des dernières innovations en matière de conception de mât. En ce qui concerne les mâts de course, une règle de base est d'obtenir un mât le plus raide possible, dans les limites du raisonnable. En plus des explications contenues dans ce chapitre, cette raideur permet également de réduire le dévers d'étai dans le gros temps.

totale de pinces dans une voile ou la quantité de pinces par mètre carré. La grand-voile d'un bateau de plus grande taille aura moins de pinces par rapport à sa superficie que la voile d'un bateau plus petit. Les plus grands bateaux étant plus rapides, la vitesse du vent apparent est plus élevée (AWS). Autrement dit, on a un AWA plus étroit qui appelle à des formes plus plates. À noter également que plus le bateau est grand, plus la voile est haute, et plus cette dernière sera à même de bénéficier d'un vent supérieur en raison de l'effet de gradient. En outre, plus la conception de la coque est moderne, plus le bateau peut remonter au vent. Rappelons que les angles de tire des génois sur les bateaux de compétition étaient de l'ordre de 7 ou 8 degrés en moyenne il y a dix ans et 9 ou 10 degrés il y a vingt ans. Aujourd'hui, ils sont à environ 4 à 5 degrés dans le médium. Par conséquent, le dessinateur de voiles ajustera son moule en fonction de l'angle de tire en lui conférant une forme plus ou moins volumineuse. Pour établir un lien entre la quantité absolue de pinces et la taille de la grand-voile, les dessinateurs de North ont tendance à analyser le creux de la médiane, c'est-à-dire qu'ils prennent une section verticale de la voile en son milieu. Comme ils le font avec la mesure de la profondeur de creux sur une section horizontale, ils prennent en considération le creux le plus profond sur la verticale. Un bateau de course-croisière typique pourrait avoir une profondeur d'environ 30 pour cent de plus que celle d'un bateau de course high-tech ou celle d'un bateau de course de grande taille. L'utilisation de la profondeur de la section médiane verticale comme mesure relative est essentielle compte tenu du fait qu'une grand-voile de petit dériveur aurait à peu près la même quantité de pinces totale qu'une grand-voile d'un bateau de course de 80 pieds[9]. Une fois que la quantité requise de pinces est déterminée, l'étape suivante est de s'assurer que l'extrémité arrière de la grand-voile pourra être correctement réglée, à savoir un vrillage de chute adéquat. L'objectif est de rendre ce vrillage linéaire ou même légèrement exponentiel, ce qui est extrêmement difficile à accomplir. Rappelez-vous la discussion ci-dessus : une grand-voile ayant un dévers à mi-chute est peu performante. Le vrillage linéaire est obtenu par une répartition correcte du volume. Comparez une grand-voile triangulaire (normale) avec une grand-voile à corne. On passe d'un sommet triangulaire à une corne qui peut mesurer plusieurs mètres, ce qui la rapproche d'un rectangle. Cette zone de voile ajoutée nécessite un support supplémentaire en plus d'une latte. Ce soutien, qui empêche la voile de vriller au point de faseyer, ne peut venir que d'une augmentation de creux. Une grand-voile à corne, par définition, possède une distribution de volume plus marquée en son sommet qu'une grand-voile triangulaire. À noter que la distribution de volume est effectuée verticalement et horizontalement. Ceci soulève un point intéressant. Les marins ont toujours raisonné en termes de forme horizontale ; autrement dit, ils appréhendent la voile d'une manière transversale comme l'illustrent les bandes de visu. Dans le passé, les concepteurs avaient la même perspective, du moins les dessinateurs de North. Ils concevaient généralement des pinces horizontales. Cependant, l'avènement du 3DL et du 3Di a changé la donne. Depuis que les moules physiques (sur lesquels les voiles 3DL et 3Di sont fabriquées) peuvent être contrôlés sur le moindre centimètre carré, les dessinateurs de North raisonnent désormais aussi bien verticalement qu'horizontalement, à la manière des concepteurs d'ailes d'avion. Et comme les dessinateurs de North qui travaillent dans un environnement 3D (et non plus 2D) naviguent et échangent avec les régleurs professionnels, ces derniers commencent eux aussi à appréhender la voile de manière continue et non plus discrétisée. Cette philosophie s'applique désormais aux programmes de dessin de North. Enfin, si l'on considère à quel point le vrillage de chute est critique, peut-être que tous les régleurs devraient penser verticalement.

9 Cela est probablement dû à des gréements plus souples pour une surface de voile donnée. Les bateaux comme le monotype Etchells, par exemple, sont plus larges relativement à leur longueur, et sont équipés d'une coque, d'une quille et d'un safran traditionnels.



SailType ; Main Blue...Actual

Height	CAMBER	DRAFT	TWIST	ENTRY	EXIT	FORE_CAM	BACK_CAM
25.0	8.0	41.6	0.6	18.7	-12.7	73.7	71.5
50.0	10.1	42.0	3.7	29.7	-11.5	79.2	71.1
75.0	9.3	36.6	7.2	34.6	-6.5	78.0	70.9
87.5	6.8	35.3	8.4	31.5	-1.8	77.5	71.7

Lorsque le cintre du mât correspond au rond de guindant, la voile s'aplatit. (North Sails, LLC.)

Figure 7.5 (ci-contre). Grâce à la digitalisation des bandes de visu, le programme de numérisation de voile développé par North Sails (ASA) crée automatiquement des données de sortie intéressantes. La hauteur fait référence à l'emplacement vertical sur la voile au-dessus de la bordure. Le creux, sa position et le vrillage sont des thématiques évoquées dans ce livre. Les entrées et sorties se réfèrent aux angles de la voile pour les sections avant et arrière. « *Fore_Cam* » et « *Back_Cam* » correspondent aux profondeurs de ces sections. La voile photographiée est celle de *Bronenosec Gazprom*, un TP 52 appartenant à Vladimir Liubomirov.

USA
25555
USA
95
SPOOKIE
R88

Les voiles d'avant

Les principes de forme et de réglage des voiles d'avant s'appliquent aussi bien en course qu'en croisière. Ils s'adaptent également à tous types et tailles de bateaux. En outre, même s'il existe des différences spécifiques, la plupart des enseignements tirés du réglage et de la conception des grands-voiles dans le chapitre précédent s'étendent aux voiles d'avant. De nos jours, les voiles d'avant de bateaux de course modernes s'apparentent de plus en plus à des grands-voiles. En effet, l'utilisation de lattes permet aux dessinateurs de créer des voiles d'avant plus grandes pour un triangle avant donné et de compenser également le creux de la chute ou d'obtenir un rond de chute positif.

Tout au long de ce livre, nous utilisons le terme voile d'avant, que ce soit pour un génois ou un foc. Les génois, rarement rencontrés sur les voiliers modernes, ont été remplacés par le foc 100 % LP désormais omniprésent. L'abréviation LP (*Luff Perpendicular*) signifie perpendiculaire au guindant.

L'« ancien » *Dorade* (1929) face au « récent » *Comanche* (2014) en 2015 lors de la Rolex Transatlantic Race. Alors que *Comanche* arbore une garde-robe 3Di dernier cri, *Dorade* régate avec son génois et sa grand-voile 3DL (600 TF). Notez l'écart important de l'angle de tire entre les deux voiles d'avant. D'après nos explications dans ce chapitre, *Dorade* doit border son génois autour des haubans. (Photo Daniel Forster/Rolex.)

Ci-contre, des oiseaux de même plumage ? Le 40 pieds (12,2 mètres) *Spookie* signé Carkeek, mené par Steve et Heidi Benjamin, et le 88 pieds *Rambler 88* (26,8 mètres), un plan de Juan Kouyoumdjian, barré par George David, durant la 161e régate annuelle du New York Yacht Club, organisée par Rolex en 2015. Les deux voiliers sont équipés de voiles 3Di RAW de North Sails. (Photo Daniel Forster/Rolex).

Les différences de forme et de contrôle entre les voiles d'avant et les grands-voiles sont minimes. Un régleur de voiles applique quasiment les mêmes techniques de réglage pour contrôler le volume, la position du creux et le vrillage pour les deux types de voiles. Cela dit, rappelons l'adage qui met en évidence les disparités entre ces deux voiles : on navigue avec le guindant du foc et la chute de la grand-voile. Cela explique pourquoi il existe des régleurs de grands-voiles et des régleurs de voiles d'avant. Ah, la spécialisation !

Contrairement à la grand-voile, aucune voile d'avant ne couvre une plage de force et d'angle de vent importante[1]. Notons que c'est la forme et non la taille qui distingue les voiles de petit temps des voiles de médium et de brise sur la plupart des voiliers de course modernes. Les nombreuses voiles d'avant qui couvrent la plage de vent en régate ont le même allongement (AR) qui est fonction du triangle avant (I/J), tel que déterminé par l'architecte naval (J est la base du triangle avant du mât à l'étai, I est la hauteur du triangle avant). Le Code 4 (foc de brise) avec sa longueur de guindant plus courte et le tourmentin (voile de tempête) font exception.

Il existe toutefois des différences entre la grand-voile et la voile d'avant. Les grands-voiles sont munies de cunninghams. Pour autant, les régleurs n'ajustent presque jamais la tension de la drisse. Les voiles d'avant possèdent parfois des systèmes de réglage d'amure ou des cunninghams. Les grands-voiles ont des chariots d'écoute, alors que la majorité des bateaux disposent de rails longitudinaux pour les voiles d'avant. Cela dit, la plupart des voiliers de course et presque tous les monotypes munis de voiles d'avant utilisent un barber-hauler[2] qui remplit la même fonction qu'un chariot d'écoute. Depuis le milieu des années deux mille,

1 Certains voiliers, typiquement des monotypes et des bateaux de course à gros budget, disposent de deux grands-voiles, généralement une pour le petit temps et le médium, et une grand-voile spécifique pour la brise.

2 Nom donné d'après les frères Barber (originaires de San Diego, États-Unis) qui, dans les années cinquante, mirent au point une solution pour border plus fermement le génois sur leur Lightning. Tout comme le nom Cunningham donné d'après Briggs Cunningham, le défunt skipper de *Columbia* (voilier victorieux de la Coupe de l'America de 1958), ces systèmes de réglage ont conservé le nom de leur créateur.

Observez l'angle de tire étroit sur ce TP 52. Cette configuration est rendue possible grâce à l'évolution technologique des quilles, safrans et carènes. Aussi, les yachts d'aujourd'hui disposent de mâts plus grands et plus légers généralement en fibre de carbone, des bômes plus longues et des voiles d'avant sans recouvrement. De nos jours, les voiles d'avant sur les bateaux modernes sont bordées à 4 ou 5 degrés. Il y a dix ans, à 7 ou 8 degrés, et il y a vingt-cinq ans de 8 à 10 degrés. Le voilier sur cette photo est *Bronenosec Gazprom*, un TP 52, appartenant à Vladimir Liubomirov.
(Photo North Sails, LLC.)

on observe également de nombreux voiliers high-tech de course équipés de rails latéraux avec un halebas dont le mécanisme est similaire au chariot d'écoute sur les grands-voiles. Les voiles d'avant, tout comme les grands-voiles, ont des nerfs de chute et sont munies le plus souvent de nerfs de bordure. En outre, toutes les voiles d'avant de course possèdent des lattes. Enfin, pour contrôler le volume général et la position du creux sur les grands-voiles, on utilise le cintre du mât, tandis que sur les voiles d'avant, c'est la flèche d'étai qui accomplit cette même fonction.

Aérodynamique de la voile d'avant

Avant de se plonger dans les formes et le réglage des voiles d'avant, une révision des chapitres 3 et 4 sur l'aérodynamique s'impose. Pour comprendre pourquoi une voile d'avant doit être réglée d'une certaine manière, il est utile de comprendre pourquoi l'angle de tire d'une voile d'avant est de 4 à 5 degrés typiquement sur un voilier high-tech de course, alors qu'il y a seulement dix ans l'angle de tire en moyenne sur les bateaux de course était de 7 à 8 degrés, et entre 8 et 10 il y a vingt-cinq ans. Il faut aussi comprendre pourquoi les voiles d'avant sont récemment devenues beaucoup plus plates.

Commençons notre discussion par le réglage des voiles d'avant en fonction de leur allongement. Par exemple, le réglage autour du galhauban et du bas-hauban présente un problème pour les bateaux plus anciens et leurs génois de faible allongement. Cela est particulièrement vrai lorsque les bases des haubans sont positionnées très à l'extérieur. D'un point de vue aérodynamique, les bordures de ces génois sont sans doute trop longues, mais cette longueur est nécessaire pour obtenir un angle de tire suffisamment étroit. En fait, certains génois sont conçus avec plus de volume que ce qui est souhaitable dans le but de mieux contourner les haubans. Dans ce compromis, on privilégie l'aspect pratique par rapport aux critères aérodynamiques. Ce qui explique, en partie, pourquoi le bureau d'études de North ou les architectes navals conseillent généralement aux propriétaires, soucieux d'optimiser leurs anciens bateaux au meilleur coût, d'augmenter la hauteur du mât, d'allonger la bôme et d'utiliser des voiles d'avant sans recouvrement. Nous mentionnons cet exemple parce qu'il existe beaucoup de bateaux dans le monde aujourd'hui, et en particulier aux États-Unis, qui régatent à un haut niveau avec des règles à handicap telles que la jauge IRC ou ORCi, et qui sont suffisamment anciens pour utiliser des voiles d'avant avec recouvrement.[3]

La voile d'avant moderne sans recouvrement et bordée très serré permet de naviguer plus haut. Pourtant, cette option ne serait envisageable que si l'on apportait des améliorations hydrodynamiques à la quille, aux safrans et même à la carène. Ces éléments doivent aussi opérer à un angle d'attaque plus étroit. C'est un mythe cependant de croire que ces bateaux modernes sont plus difficiles à barrer au près. Bien sûr, la marge de manœuvre est faible. Mais celle-ci est en partie dictée par le bord d'attaque volumineux de la voile d'avant comme nous le verrons. Pourtant, avec l'évolution des carènes, de la quille et des safrans, les bateaux modernes sont très équilibrés, même s'ils requièrent un bon toucher de barre et surtout un réglage de voiles précis.

3 Même s'il est vrai que certaines combinaisons génois/grand-voile semblent plus performantes dans une plage étroite de vent léger, un design, une forme de voiles et un plan de voilure adaptés peuvent corriger la plupart des problèmes.

Règle de base : se fier au guindant du foc et à la chute de la grand-voile. Observez également les lattes de la voile d'avant sur ce Melges 32. La photographie date de 2006, un an après la création de la classe. (Photo North Sails, LLC.)

En somme, le bon équilibre résulte d'un réglage correct des voiles (voir ci-dessous). Au risque de paraître redondant, rappelons qu'un bateau navigue avec le guindant de la voile d'avant et la chute de la grand-voile. C'est entre autres l'une des raisons pour lesquelles les profils avant des deux voiles ont des formes si radicalement différentes au près.

Nous avons vu dans les chapitres sur l'aérodynamique que la voile d'avant évolue dans une adonnante par rapport à la grand-voile à cause de la déflexion de l'air en amont de cette dernière. Ce phénomène explique pourquoi les voiles d'avant ont un volume plus marqué sur l'avant (plus de courbure) que les grands-voiles. Le volume du bord d'attaque, aussi appelé entrée, est contrôlé principalement par le dévers d'étai. La flèche sous le vent et vers l'arrière correspond au dévers d'étai dont la courbure est opposée au cintre du mât, mais remplit la même fonction. Par contre, un étai ne sera jamais impeccablement droit même dans le vent très léger. Tout cela n'explique pourtant pas pourquoi une configuration voile d'avant sans recouvrement/grand-voile sur un voilier au gréement fractionné affiche une meilleure performance qu'un ensemble génois/grand-voile avec un gréement en tête sur le même bateau et pour une surface de voile totale donnée. Si l'on considère l'aérodynamique dans sa forme la plus simple, la première fonction d'une voile est de changer la direction du vent. S'ensuivent alors de nombreux phénomènes fondamentaux tels qu'expliqués dans les chapitres sur l'aérodynamique.

En résumé :

- changement de direction du vent (foil) ;
- viscosité (formation de la couche limite) ;
- tourbillon initiateur (la petite roue en mouvement) ;
- circulation (la grande roue en mouvement) ;
- condition de Kutta (même vitesse de part et d'autre du bord de fuite).

Cette première étape (changement de direction du vent) explique pourquoi le gréement fractionné à fort allongement est plus efficace que le gréement en tête à faible allongement. En réduisant la surface sur l'arrière du génois et en augmentant la partie haute de la grand-voile (la longueur du guindant du foc reste probablement similaire à la longueur initiale), on obtient une combinaison de voile à fort allongement qui permet à une plus grande partie de l'écoulement libre de changer de direction. C'est une fonction de la longueur du guindant. On comprend aussi pourquoi les planeurs doivent avoir une plus grande envergure d'aile que les avions de même taille qui utilisent la poussée moteur. Plus la quantité de flux qui change de direction est importante, plus la portance augmente. En outre, un plan de voilure à l'allongement élevé a un tirant d'air plus substantiel. Il peut atteindre des vitesses de vent supérieures qui favorisent une portance totale plus élevée résultant d'une plus grande force de vent. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, l'angle de tire d'une voile d'avant sans recouvrement peut être très serré, car le point d'écoute n'a pas à contourner le gréement. On navigue alors plus près du vent, et à condition de ne pas trop augmenter la traînée, la vitesse VMG devrait être meilleure : vitesse de rapprochement à la bouée au vent. Comme mentionné plus haut, la partie avant de la voile d'avant se situe dans une adonnante relative. Aussi, il y a plus d'écoulement libre dévié sous le vent de la voile d'avant que sous le vent de la grand-voile. Si l'écoulement libre est d'environ 10 TWS, l'écoulement sous le vent le long de la voile d'avant pourra atteindre 16 TWS, soit 60 pour cent de plus. Donc, pour une surface équivalente, le foc créera plus de portance que la grand-voile. Néanmoins, cette augmentation de vitesse sous le vent, c'est-à-dire un gradient de pression accru (en effet l'écoulement accéléré sur l'extrados doit ralentir quand il rencontre l'écoulement provenant de l'intrados) est atténuée par l'écoulement qui accélère sous le vent de la grand-voile. Avec un foc 100 % LP, cet écoulement sous le vent de la grand-voile, qui se mélange alors à l'écoulement au vent de la voile d'avant, accélère juste au moment où il atteint la zone de la chute du foc. Un *timing* parfait ! Ceci explique en partie pourquoi un gréement fractionné avec un foc 100 % LP est plus efficace qu'un gréement à tête de mât et un génois à recouvrement. Cela répond en partie à notre question posée plus haut, à savoir qu'un gréement fractionné avec un foc 100 % LP est plus efficace qu'un gréement à tête de mât et un génois à recouvrement (fig. 8.1).

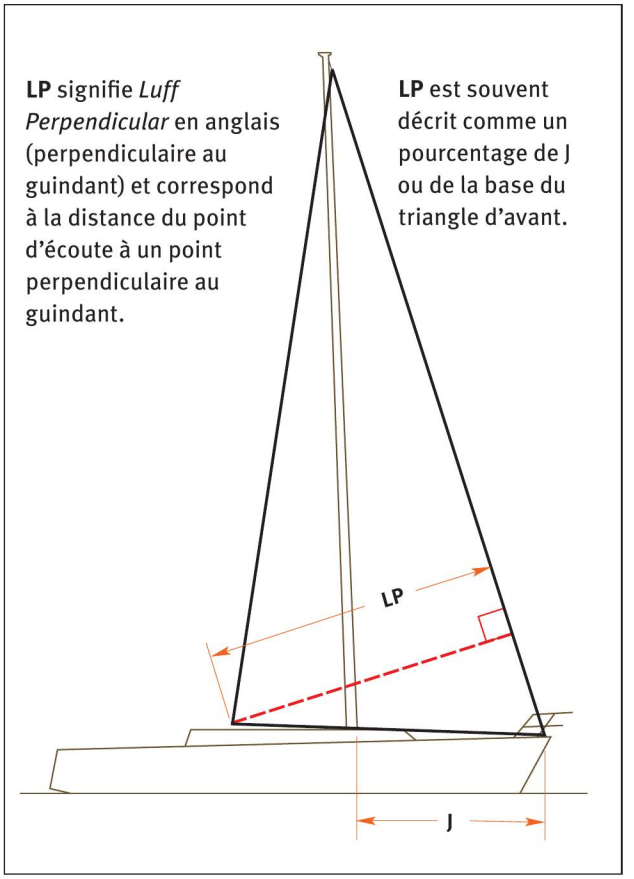


Figure 8.1 La plupart des voiles d'avant sont des voiles 100 % LP et sont désignées plus précisément sous le terme de foc. Pour les bateaux dotés d'un foc, c'est la forme et non la taille qui distingue les focs de petit temps de ceux pour le médium ou la brise. Le dessin montre comment déterminer la mesure LP.

Gros plan sur le guindant du foc

Dans le chapitre sur la grand-voile, l'accent était mis sur la chute. Si l'on règle correctement la chute de la grand-voile, on améliore le rapport portance/traînée en minimisant la traînée induite. Mais surtout, on rend le bateau plus facile à la barre. Une voile d'avant produit le même effet pour des raisons différentes, mais surtout grâce au guindant. Cela explique pourquoi, comme avec la grand-voile, le volume général et la position de creux, tout en étant importants, ne sont pas aussi critiques que la courbure et la configuration du guindant. Le dévers d'étai, courbure opposée à celle du cintre du mât, contrôle principalement le creux et la position de creux maximal d'une voile d'avant. Cependant, le creux et la position de creux maximal ont tendance à résulter de la courbure avant de la voile plutôt que l'inverse.

Observons deux exemples très différents pour le même bateau et la même voile d'avant : une voile dans 15-16 nœuds de TWS et une mer calme ; l'autre avec la même TWS mais avec un clapot résiduel substantiel. L'exemple d'un plan d'eau plat avec une forte

brise correspond à des conditions idéales pour naviguer haut. Les voiles peuvent être bien bordées ; le barreur peut barrer depuis sa position préférée au vent et s'assurer que les penons du guindant du foc flottent constamment. Dans ces conditions, naviguer trop haut n'est pas trop pénalisant. Les vagues sont petites et ne ralentiront pas le bateau. Grâce à ce vent fort, on génère également une portance suffisante et une faible traînée, du moins tant que la force de gîte n'est pas un facteur limitant (chapitre 7). Quand la mer est forte, le scénario se complique. Si vous lofez trop dans une rafale, alors une vague pourra considérablement ralentir le bateau. Lorsque ce dernier ralentit à cause de l'impact, l'AWS diminue et l'AWA augmente. Si le barreur abat pour reprendre de la vitesse, cela entraînera une gîte excessive. S'il lofe de manière à rétablir un angle de vent apparent (AWA) correct, le bateau pourra ralentir encore plus dans la vague (ou la suivante). Arrive soudain une rafale. À faible vitesse, le bateau gîte excessivement, ce qui oblige de nouveau le barreur à lofer rapidement, mais cette manœuvre nécessite généralement du temps. La portance sur le safran est alors négative. Vous avez peut-être déjà remarqué que les grosses vagues ont tendance à venir en série, souvent de trois. Quand une deuxième vague arrive, le bateau ralentit d'autant plus. C'est un cercle vicieux. Le régleur de voiles d'avant inexpérimenté peut croire que c'est au régleur de grands-voiles de rectifier ce problème. Cependant, le réglage du foc apporte une contribution significative. Par mer plate, l'étai peut être tendu, et la voile bordée davantage. Le bord d'attaque du foc s'aplatit alors, ce qui permet au bateau de naviguer plus haut sans déventer le guindant. Cela permet aussi d'aplatir la voile et de reculer la position de creux. Par mer calme et vent moyen (généralement supérieur à 10 TWS), générer de la portance ne présente pas de difficulté particulière. Aussi, réduire le dévers d'étai s'avère efficace pour gagner en cap. Lorsque la mer est forte, la situation est plus complexe. Le barreur cherche à avoir des entrées de foc plus prononcées pour trois raisons. Premièrement, comme les vagues chahutent l'étrave, l'angle d'attaque du guindant varie constamment dans de telles conditions. Sachant qu'il est très pénalisant de faire décrocher le foc, on privilégie un bord d'attaque plein qui sera plus tolérant. Le foc déventera plus tôt pour indiquer qu'on navigue trop haut. Aussi, il décrochera moins (c'est-à-dire qu'il génèrera une bulle de séparation plus petite) sous le vent lorsque le barreur barre trop bas. Deuxièmement, il est plus facile de barrer un voilier avec un foc au profil avant plein. Troisièmement, le volume général est accru avec la position de creux maximale avancée. Ces deux derniers paramètres contribuent à générer plus de portance, et donc une force d'entraînement suffisante pour propulser le bateau dans cette mer agitée. Toutefois, il revient au régleur de grand-voile de contrôler la gîte et de faciliter le travail du barreur.

Le réglage : un sport d'équipe

Pourquoi précisément le réglage des voiles d'avant est-il plus délicat par mer forte ? La voile d'avant est fixée à l'étai qui à son tour est fixé au mât. Tout changement de tension d'étai va donc influer sur la charge du mât, c'est-à-dire sur la compression dans le tube. Lorsque le pataras ou les bastaques exercent une tension sur le mât, l'étai se tend. Deux choses se produisent : une réduction de la flèche d'étai et une augmentation de la compression sur le mât. Laquelle, tous facteurs considérés, entraîne une augmentation du cintre du mât, qui se traduit par une grand-voile plus plate. Sur un plan d'eau agité dans 15 TWS de vent, lorsqu'on choque le pataras pour légèrement augmenter le dévers d'étai, on diminue la compression dans le mât. Le cintre du mât étant maintenant réduit, la grand-voile se creuse. Même si cette option paraît avantageuse (puisqu'il faut générer une certaine puissance à travers les vagues), la grand-voile pourra finir par être trop creuse, entraînant des effets indésirables dont probablement une force de gîte excessive. Le réglage est donc un sport d'équipe impliquant trois membres clés : le barreur, le régleur de grands-voiles et le régleur de voiles d'avant. Aussi, il faut toujours tenir compte de la grand-voile lorsqu'on règle le foc et vice versa.

Réglages de la voile d'avant

Des différents réglages des voiles d'avant, la tension de l'écoute est évidemment la plus critique. Malheureusement, les régleurs inexpérimentés se focalisent uniquement sur cet aspect, négligeant la forme du guindant qui est tout aussi importante. Pourtant, les règles de base de la tension de l'écoute doivent être assimilées. La plupart des bateaux de course high-tech utilisent un système de réglage latéral, c'est-à-dire un rail fixé transversalement sur le pont comme le chariot de grand-voile, qui permet de varier les angles de tire toujours par rapport à la ligne médiane, sans la complication d'un barber-hauler. Ainsi, un régleur de foc dispose de trois réglages d'écoute, généralement dissimulés sous le pont avec des taquets coinceurs : rentré (angle de tire serré), écarté (angle plus ouvert) et vertical (qui agit principalement sur la forme de la chute, mais sert également au réglage longitudinal). Avec un pont peu cambré, les réglages intérieurs/extérieurs n'affectent pas le vrillage de la chute ou le volume général, tandis que les réglages verticaux modifient l'angle de tire longitudinal, et dans une bien moindre mesure l'angle de tire latéral. Par conséquent, les régleurs avertis ajustent rarement la tension de l'écoute sans modifier les autres réglages. Quand il est choqué, le point d'écoute tend naturellement à glisser vers l'avant et vers l'extérieur. Dans le haut de range de la voile d'avant, il faut s'attendre à ce que la poulie qui guide l'écoute soit loin du rail. Cela aura pour effet de tendre la bordure. Lorsque l'AWS diminue, on choque l'écoute de la voile d'avant et on avance le point de tire ou on l'abaisse pour progressivement accroître le volume requis dans la partie inférieure de la voile.

Supposons que la voile d'avant et la grand-voile soient idéalement réglées dans des conditions de vent données. Alors que l'écoute est choquée (et le chariot est déplacé vers l'intérieur afin de conserver le même angle de tire), la distance entre le point d'écoute et le point de drisse diminue, permettant à la chute d'ouvrir. Notre compréhension de l'aérodynamique nous fournit des éléments de réponse. Avec le point d'écoute avancé, les sections sur la partie inférieure sont maintenant plus creuses tandis qu'elles s'aplatissent dans la partie haute, car la chute s'est déplacée sous le vent par rapport au bord d'attaque de la voile d'avant. Les zones inférieures génèrent donc plus de portance, et les zones supérieures en produisent moins. Ainsi, le centre d'effort (CE) sur le foc se sera déplacé vers le bas, réduisant la force de gîte. En contrepartie, la pression sur le gréement diminue, augmentant ainsi le dévers d'étai, ce qui creuse à son tour la voile dans son ensemble. Par conséquent, choquer l'écoute aura des effets à la fois bénéfiques et indésirables.

Léger « choqué » de foc

Un léger « choqué » de foc est un moyen rapide de réduire une force de gîte excessive, mais ce n'est pas la meilleure technique. Choquer la grand-voile ou le chariot s'avère plus efficace. Pourtant, cela reste un bon moyen de minimiser la traînée induite et permet au bateau de mieux traverser une zone de vent léger, le sillage d'un bateau à moteur ou de grosses vagues. Abaisser le CE du foc en augmentant le vrillage est souhaitable, car choquer l'écoute permet de réduire la force de gîte. Ainsi, le barreur devrait abattre pour gonfler les voiles et maintenir le même angle et la même force de gîte pour toutes les raisons que nous avons évoquées. En même temps, les sections basses se creusent davantage. Dans certaines conditions (par exemple 14 nœuds TWS, mer plate et série de grandes vagues dans le sillage d'un bateau à moteur), cette option reste la plus rapide et la plus efficace pour passer à travers les vagues en perdant le moins de vitesse possible. Cependant, si on oublie de régler les voiles dès que le bateau revient à sa vitesse d'origine (après le passage d'une vague), on perdra en cap, principalement parce que la partie haute du foc sera trop ouverte. Dans ce cas, les penons supérieurs décrochent, révélant un angle d'attaque plus petit. On perd alors en portance. En même temps, tout un ensemble d'effets parasites invisibles se produit. En revenant sur les chapitres consacrés à l'aérodynamique, on se souviendra qu'une fente plus large réduit l'effet positif de la grand-voile sur le foc. Voilà pourquoi la meilleure leçon à tirer pour les coureurs novices, qui cherchent à atteindre la bouée au vent par exemple, est de border davantage le foc, en particulier dans le vent moyen à fort.

Les techniques de réglage décrites ici sont les mêmes pour les rails longitudinaux classiques. Seule la mécanique diffère. Ces derniers sont contrôlés par le chariot. Les ajustements verticaux sont contrôlés par l'écoute et les réglages latéraux par un in-hauler ou rentreur de génois si le bateau en est équipé. Le réglage est grandement facilité en observant la vitesse cible. Ce n'est pas seulement un outil pour le barreur. C'est aussi un excellent indicateur (à condition que la vitesse cible et les instruments à bord soient précis) qui permet aux régleurs de grands-voiles et de voiles d'avant de vérifier l'adéquation des réglages aux conditions météo rencontrées. Faute de vitesses cibles correctes, il est difficile même pour un excellent barreur d'avoir des références précises.

Notre compréhension va se clarifier à mesure de notre passage en revue sur les contrôles de profils de la voile d'avant. Le dernier aspect concernant le réglage d'écoute est lié à la tension d'écoute maximale. Que signifie-t-elle et comment peut-elle être définie ? Sur la plupart des bateaux, ce sont les barres de flèche qui servent d'indicateur évident pour le réglage maximal. Pour les voiles d'avant à recouvrement, les barres de flèche constituent un obstacle. Si l'on borde trop, on peut déchirer la voile. Pour éviter ce scénario, il suffit simplement de régler l'écoute de manière que la voile effleure les barres de flèche. C'est un réglage idéal, à condition que les longueurs des barres de flèche correspondent à l'emplacement optimal de la voile d'avant. Mais ce n'est pas toujours le cas malheureusement. Tous les gréements sont différents. Sur la majorité des bateaux à gréement en tête équipés de voiles d'avant à recouvrement et multiples barres de flèche, le génois tend à toucher la barre de flèche supérieure en premier, puis celle du bas et enfin les barres du milieu. Reportez-vous aux remarques précédentes sur l'évolution des angles de tire dans la conception des voiliers au fil des années. Les angles de tire se sont resserrés tout comme les cadènes de haubans par définition. La conception et la construction des mâts en carbone ont suivi le même développement que celui des bateaux. On peut imaginer la pression qu'exerçaient les propriétaires, les marins et les maîtres-voiliers sur les architectes navals et concepteurs de mâts pour réduire l'angle de tire des voiles. Aujourd'hui, ce lobbying a porté ses fruits. Certains propriétaires se sont même résolus à raccourcir les barres de flèche supérieures, bien qu'il ne soit pas recommandé de le faire. Il est préférable de demander à votre voilerie d'apposer des renforts de barres de flèche plus substantiels afin de pouvoir border davantage votre voile.

La traînée aérodynamique relative à l'envergure de la barre de flèche supérieure est nettement contrebalancée par un meilleur angle au vent. Pour les focs dont le point d'écoute se situe devant les barres de flèche et les haubans, les marques sur les barres de flèche sont primordiales. Il faut être capable de répéter des réglages rapides. Tous les bateaux de course devraient être bardés de repères de réglage rapide adapté aux multiples conditions. Pour déterminer l'emplacement de ces marques, utiliser les données référencées plus haut afin de créer un vrillage total de 16 à 19 degrés. En règle générale, vous vous retrouvez avec au moins deux réglages de vrillage : en recherche de puissance lorsque tout l'équipage n'est pas au rappel et bien toilé quand tout l'équipage est au rappel.

Ericsson 4, un Volvo 70 vainqueur de la Volvo Ocean Race 2008-2009. Bien que peu de bateaux modernes utilisent des voiles d'avant avec recouvrement, les bateaux de la Volvo, à la fois durant cette édition et en 2011-2012 (ce n'est pas le cas en 2014), sont des exceptions. Sur ces bateaux, le génois à recouvrement fonctionne bien dans le médium, car les bateaux de la Volvo nécessitent de la puissance tant que la force de gîte n'est pas un facteur limitant. Les TP 52 utilisent des génois en tête (MHG) pour la même raison. Cela dit, les voiliers de la Volvo naviguent rarement au près serré. Dans les courses au large, le mode habituel de navigation au près est un près dit océanique, c'est-à-dire légèrement abattu par rapport au près serré VMG pur. *Ericsson 4* a établi un record de vitesse à la voile sur 24 heures de 596,6 nm, soit une vitesse moyenne de 24,84 nœuds, battu depuis par le voilier *Comanche*. (Photo Volvo Ocean Race/North Sails, LLC.)

Sur un bateau de course avec un génois à recouvrement, le défi est le même, mais il se complique avec les contraintes des barres de flèche. Si le génois est appuyé au point de se déformer au niveau de la barre de flèche supérieure et touche la barre de flèche inférieure ou la base du hauban, mais décolle des barres de flèche du milieu, c'est qu'il y a probablement un problème. Rappelez-vous la discussion sur la zone de chute critique de la grand-voile et les inconvénients du dévers du milieu de chute. Sur les voiles plus anciennes, la tension de drisse permet de réduire la flèche du milieu de chute.

La recoupe de la voile est une autre solution : par exemple, les sections inférieures peuvent être relâchées afin de rapprocher la mi-chute du gréement. Le but est d'obtenir un vrillage linéaire. Naturellement, la meilleure solution est l'achat d'une nouvelle voile le moins élastique possible. À défaut, vous pouvez simplement tirer plus sur l'écoute sauf si les sections arrière sont si rondes que l'écoulement se sépare sous le vent beaucoup trop tôt. Comment le saurez-vous ? Regardez autour de vous durant la compétition et vous aurez la réponse ! Être conscient du réglage maximal pour vos voiles dans toutes les conditions est la clé. Mais comment ? Alors que les barres de flèche ou marques de barres de flèche peuvent s'avérer de bons indicateurs, l'improvisation s'impose dans d'autres conditions. Par exemple, lorsque le Windex ou autres instruments de vent indiquent une refusante en tête de mât dans le gradient de vent naturel, et que l'on a une adonnante sur le bord opposé (normalement signe d'un changement de direction de vent significatif), le profil du vrillage doit être modifié. Dans le cas d'un vent refusant en tête de mât, le point de tire doit être avancé, et la voile bordée davantage, et vice versa sur l'autre bord. Parfois, une situation tactique impose qu'on lofe le bateau au vent pour le forcer à virer de manière à pouvoir virer du côté favorable du plan d'eau. Dans ce cas, vous allez régler votre bateau en mode de navigation très haut temporairement, principalement en bordant davantage, et en creusant les voiles en fonction de la force de gîte. Comme mentionné ci-dessus, une réduction de la flèche d'étai combinée à un réglage plus puissant de la grand-voile permettra d'effectuer cette manœuvre efficacement.

Avant de quitter la partie sur le réglage des écoutes, nous allons approfondir l'une des questions posées ci-dessus : pour une surface de voiles donnée, pourquoi un bateau au gréement fractionné est-il plus performant qu'un gréement en tête de mât ? La réponse vient de la circulation. À première vue, on pourrait conclure que c'est la partie de la grand-voile au-dessus du capelage qui est très efficace. Après tout, elle se situe dans l'écoulement libre et au-dessus de la majeure partie de l'air dévié. Toutefois, cette partie de la grand-voile ne profite pas du travail du foc qui réduit efficacement le gradient de pression. L'une des principales raisons pour lesquelles un gréement fractionné est plus performant, à surface identique, est qu'il est possible de border davantage le haut de la voile d'avant. Cette action augmente l'angle d'attaque, générant plus de portance et donc plus de cap ou une meilleure VMG. On obtient aussi une traînée plus importante. En revanche, cette partie haute du foc est suivie par une plus grande surface de grand-voile, réduisant son gradient de pression verticale, donc son tourbillon marginal. Dans le cas d'un gréement en tête, la corde de la grand-voile est si courte près du sommet du foc que la circulation est minime, réduisant alors les deux effets positifs clés sur les parties supérieures du foc. En outre, les tourbillons marginaux du foc et de la grand-voile se combinent pour en former un plus grand. Reste qu'il n'est jamais bon d'augmenter la traînée induite !

Le creux

La profondeur, ou le creux, est la prochaine étape logique dans le réglage des voiles. Les régleurs expérimentés peuvent estimer la profondeur visuellement, en utilisant simplement des bandes de visu. Pour les autres, il faudra avoir recours à des photos prises depuis le milieu de la bordure vers le haut de la voile et les analyser à l'aide d'un programme de numérisation qui fournit toutes les mesures relatives à la forme de la voile. Votre maître-voilier peut le faire pour vous. La bande de visu est une représentation visuelle de la section de la voile à un point donné.

Le creux maximal est exprimé en pourcentage de longueur de corde. La photo de la page 142 montre un foc médium (Code 2) pour un voilier de course-croisière. Observez le vrillage

linéaire, l'augmentation de la profondeur maximale de bas en haut en passant par le milieu, et la position de creux qui recule avec la hauteur. Étant une voile de médium, ce foc a un creux relativement avancé et une cambrure plus marquée qu'un foc de brise (Code 3).

Les données de vrillage font référence au vrillage par rapport à chaque bande de visu. Il est exprimé en degrés par rapport à chacune des bandes. Le vrillage peut atteindre 6,4 degrés entre la bande inférieure et celle du milieu, et peut être de 6 degrés entre la bande supérieure et celle du milieu. Il est difficile d'obtenir un vrillage plus linéaire que ça. Parce que les voiles sont constamment en mouvement, chaque photo montrerait des données légèrement différentes, même avec la même vitesse de vent. Pour cette raison, un concepteur de voiles consciencieux ne se fierait jamais à une seule photo.

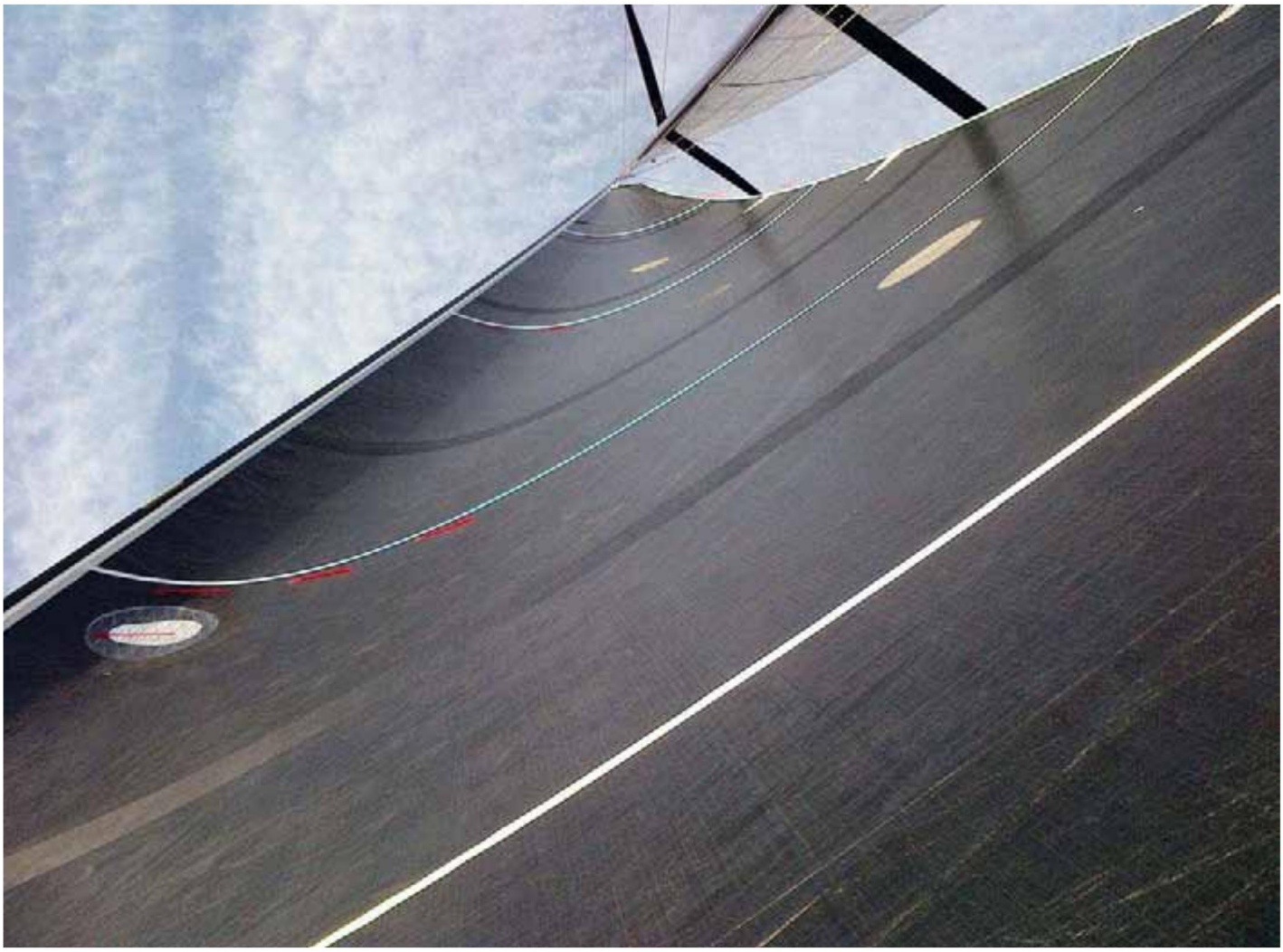
La position de creux est principalement liée au dévers d'étai, et dans une moindre mesure à la tension de drisse. Au temps des voiles en Dacron, la tension de drisse permettait d'avancer la position de creux maximal afin d'aplatir les arrières de la voile quand le moment de gîte devenait problématique. L'évolution des matériaux et de la construction a abouti à des voiles moins élastiques, rendant la tension de drisse moins efficace pour ce réglage. Avec le 3Di – la technologie de voile la plus raide sur le marché –, la plupart des régleurs chevronnés règlent la tension de drisse de manière à effacer les plis au niveau du guindant de la voile[4].

Lorsque la tension d'étai est relâchée (en réglant le pataras sur un voilier à gréement en tête ; en réglant les bastaques sur un bateau à gréement fractionné), le milieu de l'étai verse à la fois sous le vent et vers l'arrière. Il est important de savoir qu'il s'agit d'une combinaison de ces deux mouvements : toute la voile se déplace sous le vent et vers l'arrière. Typiquement, la chute s'éloigne sous le vent du gréement, mais pas autant vers l'arrière parce que l'avant de la voile se creuse. Par conséquent, les profils de voile se creusent (creux maximal plus important) et la position de creux maximal avance. Dans l'ensemble, la chute s'écarte des barres de flèche, et le vrillage à mi-chute augmente relativement au niveau des parties supérieure et inférieure de la voile. Il est donc rare qu'un régleur expérimenté diminue la tension de l'étai sans changer le point de tire afin de ramener la chute dans sa position initiale, et plus important encore, de rétablir son profil de vrillage optimal. De plus, la bordure de la voile se creuse un peu, du fait de l'avancement du point de tire sur un rail longitudinal ou au vent sur un rail transversal.

Ce point nous amène à la relation qui existe entre la capacité de remonter au vent et la forme de la voile. La plupart des marins novices pourraient croire qu'en relâchant l'étai, cela nuirait à la capacité de remonter au vent. Après tout, le creux avance et les entrées de la voile s'arrondissent. Nous espérons que les chapitres sur l'aérodynamique ont permis d'éclairer nos lecteurs sur ces points.

Examinons à présent les effets de la flèche de guindant et particulièrement son impact sur la capacité du bateau à remonter au vent. Par souci de simplicité, nous supposons une force de vent moyenne et une mer plate de sorte que la force de gîte ne soit pas un facteur limitant. Pour comprendre le principal effet positif du dévers d'étai, nous devons tenir compte de l'ensemble grand-voile/foc comme nous le ferions avec une aile à fente. En substance, on considère cette combinaison comme une seule grande voile. Ainsi, lorsque le milieu du guindant du foc verse sous le vent et vers l'arrière, l'effet positif est le suivant : l'angle entre le vent et la corde du guindant de foc à la chute de la grand-voile augmente légèrement – un plus grand angle d'attaque –, ce qui permet au barreur de lofer quelque peu. En outre, le vrillage entre le milieu et le haut de la voile est réduit parce que le milieu de la chute versera sous le vent, et aura pour effet d'augmenter la portance et la traînée induite. Si le régleur borde ensuite un peu l'écoute de foc pour ramener le profil de la chute près des marques de barres de flèche dans la position qu'il occupait avant la réduction de tension de l'étai, le foc génèrera davantage de portance (puissance). Néanmoins, le ratio portance/traînée du foc reste à peu près le même : les sections plus creuses génèrent plus de portance, mais également plus de traînée induite. L'avantage est que le bateau serre plus le vent pour la même TWS, ce qui améliore la VMG. Et, en supposant que nous n'ayons pas atteint la gîte

4 Comme indiqué ci-dessus, la plupart des bateaux de course avec des crochets de drisse utilisent un cunningham de foc pour contrôler la tension de drisse. Cette commande présente l'avantage d'affecter en premier la partie basse du foc et en dernier son sommet.



Une photo prise d'un angle classique à mi-bordure d'un foc J2 de Swan 42, voile idéale pour le médium (9-17 TWS). Une photo sans analyse de la forme ne fournit qu'une indication de performance de la voile. Ici, l'écoute semble légèrement choquée. Notez les penons qui flottent au niveau de la partie supérieure de la chute et le vrillage important qui pourrait indiquer l'imminence d'une série de vagues, une refusante, ou un régleur de voiles quelque peu distrait. L'absence de marques de réglage sur les barres de flèche complique davantage l'analyse. (Photo Paul Todd/North Sails, LLC.)

maximale, l'augmentation de la force de gîte produira plus de portance sur le safran et, par conséquent, réduira la dérive directement liée à la VMG.

Une portance accrue entraîne deux autres avantages. Une vitesse supérieure d'écoulement sur la quille engendre plus de portance à un angle de dérive donné. Plus important encore, l'augmentation de la puissance génère plus de force de gîte qui, à son tour, se traduit par un angle de barre plus grand et, par conséquent, dans un vent suffisant, la portance hydrodynamique augmente. En fin de compte, normalement, on observe une dérive réduite et une VGM accrue. Si vous êtes surtoilé, ces bénéfices issus de l'augmentation du dévers d'étai ne pourront pas être mis à profit. Donc, même en cas de brise relativement soutenue de 12 à 14 TWS par exemple, avec tout l'équipage au rappel, avoir des voiles creuses ne vous empêche pas de naviguer haut. Tout est relatif. Mais si votre objectif est de faire du cap plutôt que de la vitesse, alors souvent la solution est de creuser le foc en augmentant la flèche d'étai. Dans des conditions de vent très légères (TWS de 3 à 7 nœuds), les régleurs de voiles expérimentés privilégient le dévers d'étai à la tension d'écoute en tant que contrôle principal. La flèche d'étai a un effet plus sensible et plus immédiat que l'écoute lorsque le vent refuse[5]. Parce que le changement de tension d'étai a un effet similaire sur le cintre du mât et donc sur le profil de la grand-voile, le réglage du gréement et la communication avec le régleur de grands-voiles sont essentiels (chapitre 7). Par exemple, une quantité X de

5 Une refusante se produit lorsque le vent diminue. De notre analyse de diagramme vectoriel, nous savons que l'AWD se resserre. Une adonnante est le phénomène inverse. Les bons régleurs de voiles sont capables d'anticiper de tels phénomènes et ajustent les voiles en prévision de ces paramètres.

dévers d'étai peut sembler idéale pour une TWS de 12 nœuds dans une mer plate. Mais si la grand-voile s'aplatit, c'est que votre mât a trop de pré-cintre ou bien que les haubans ne sont pas assez tendus, ou encore les deux à la fois. De toute évidence, les deux voiles doivent fonctionner en harmonie de manière que les régleurs de grands-voiles et de focs réclament en même temps plus de tension sur le pataras ou les bastaques. Quand on se retrouve avec la mauvaise voile à cause d'un changement de conditions de vent, par exemple un Code 3 dans des conditions médium, le régleur doit à tout prix creuser la voile le plus possible. Le dévers d'étai devient alors un paramètre critique.

Résumons à présent les outils et les objectifs de réglage du foc, et apportons une explication aérodynamique afin de clarifier le processus. Rappelons que juste après un virement de bord, le passage d'une bouée, ou quand on borde sur la ligne de départ, l'écoulement autour des voiles permet de former le tourbillon initiateur : le début de toute bonne circulation. Il va de soi qu'à ce stade précoce, lorsque la couche limite n'est pas encore formée, le réglage du foc doit faciliter l'écoulement autour des voiles avec moins de tension d'écoute, plus de dévers d'étai, un vrillage global plus marqué (en particulier dans le petit temps ou dans le clapot), un angle d'attaque plus faible, moins de tension de drisse et un point de tire avancé ou remonté. Voilà pourquoi les meilleurs régleurs s'affairent pendant un virement de bord, dans le bordé sur la ligne de départ, ou en enroulant la bouée sous le vent. Les moins aguerris peuvent éprouver des difficultés à effectuer tous ces changements rapidement. Toutefois, vous pouvez toujours ajuster l'écoute et demander au régleur de grands-voiles de régler le pataras ou les bastaques. Dans 18 TWS et mer plate, non seulement il n'est pas possible d'effectuer toutes ces manœuvres après un virement de bord, mais ce n'est pas aussi critique.

Une fois la voile bordée, le tourbillon initiateur, la couche limite et la condition de Kutta se formeront rapidement grâce à la force du vent. Aussi, il faut garder à l'esprit qu'abattre avec des voiles choquées dans de telles conditions compromet votre positionnement au vent, probablement annulant tout gain de vitesse. Le but est d'atteindre l'angle optimal de VMG le plus tôt possible. Pour la plupart des bateaux de course modernes munis d'un gréement fractionné et d'un foc sans recouvrement, et dont l'équipage est particulièrement expérimenté, il y a de fortes chances qu'entre le milieu et le haut de la plage d'utilisation des focs, la bordure finisse par être très tendue à mesure que l'on passe d'un vent léger à un vent fort. Il y a quinze ans, ce n'était pas si courant. Mais est-ce un réglage rapide ? Encore une fois, les chapitres 3 et 4 sur l'aérodynamique apportent les bases de la réponse. Dans le petit temps (moins de 6 TWS), lorsqu'on borde une première fois après un virement de bord ou sur la ligne de départ, l'étrave se déplace rapidement au vent. Avec le foc choqué, mais sans aucune garantie que le barreur fasse un virement de bord fluide et lofe d'une manière constante, l'angle d'attaque peut changer considérablement et rapidement. Dans ce cas de figure, il est souhaitable d'avoir des entrées de foc rondes pour ne pas décrocher. Réduire la tension de l'étai affecte surtout le milieu du guindant et moins les extrémités (il y a tout de même une limite à la quantité de rond de guindant que les dessinateurs de voiles peuvent ajouter dans la partie inférieure). Les régleurs chevronnés entament alors le virement avec le point d'écoute relativement avancé. Une fois lancé et dans les plages de vent moyen-supérieur de la voile, ce rond de guindant n'est pas très affecté par la réduction du dévers de guindant. Ce qui explique pourquoi la bordure est extrêmement tendue pour absorber une grande partie de ce dévers de guindant.

Qu'un voilier utilise un foc polyvalent de 0 à 18 TWS ou trois voiles pour couvrir cette plage, le raisonnement reste le même. Avec un génois à recouvrement, le régleur sera probablement amené à le border contre les barres de flèche. Au fur et à mesure que la TWS augmente, il faut ajuster les paramètres suivants :

- réduire le dévers d'étai ;
- tendre la drisse, en particulier avec des voiles élastiques ;
- reculer ou abaisser le point de tire ;
- rentrer le point de tire ou border le barber-hauler ;
- plus important, augmenter la tension de l'écoute.

C'est le même raisonnement pour les focs sans recouvrement, sauf que la position de la chute doit être différente pour chacune des trois voiles. Pour ce faire, il faut alors ajouter deux ou trois repères sur chaque barre de flèche. Quant aux penons, il n'y a pas de bonne façon de

La classe Farr 40 lors du championnat du monde 2014 à San Francisco. Notez la position du point d'écoute du foc rentré à l'intérieur des rails à l'aide d'un barber-hauler. À ce stade, le foc est volontairement choqué pour permettre à *Voodoo Chile* (# 25) de prendre de la vitesse. Peu après, la bordure de ce foc se tend beaucoup plus. (Photo Rolex/Daniel Forster.)

les faire flotter. Précédemment, dans une note de bas de page, on notait la différence entre naviguer haut avec des voiles creuses (les penons au vent s'agitent alors constamment) ou naviguer bas avec des voiles aux sections plus plates (penons au vent flottant régulièrement à l'horizontale). Le meilleur compromis dépend du bateau, de sa configuration, de l'expérience du barreur, de l'état des voiles, de la précision des instruments et des données polaires pour constamment maîtriser sa vitesse cible. Du point de vue du régleur, le principal avantage de ces penons est de fournir un retour à la fois sur le vrillage (les penons avant au vent se mettent à flotter uniformément au fur et à mesure que l'angle d'attaque diminue) et sur l'angle de tire (en fonction du mouvement du penon supérieur de chute). Si ce penon supérieur de chute ne flotte pas la plupart du temps, il peut s'agir d'un décrochage de la chute vers l'avant. Si le penon flotte constamment à l'horizontale, il est probable que le foc ne soit pas assez bordé, ce qui signifie que la VMG n'est pas optimisée pour ces conditions. Au près, à allure normale, et quand tout l'équipage n'est pas au rappel, une règle approximative est d'avoir le penon de chute du haut qui décroche environ de 10 pour cent du temps en mode « normal ». Quand on navigue haut, il devrait décrocher environ de 30 à 40 pour cent du temps. Au fur et à mesure que la vitesse AWS augmente, et avec tout l'équipage au rappel, il est possible que le penon de chute du haut décroche 15 pour cent du temps. Réglez alors le foc jusqu'à la marque intérieure des barres de flèche. S'il ne décroche pas 15 pour cent du temps, il est possible de border davantage pour optimiser la VMG.

Le largue

Avec l'avènement des voiles de portant asymétriques plates destinées à des AWA serrés et les Codes 0 qui ressemblent plus à des génois à fort recouvrement qu'à des voiles de portant, on

navigue rarement au largue avec les focs ou génois. Toutefois, attardons-nous sur ce sujet, notamment pour ceux qui naviguent ou régatent au largue sans voiles asymétriques plates conçues pour les allures serrées. Le réglage d'écoute est facile. Comme on vous l'a sûrement appris lors de votre premier cours de voile, il faut choquer (l'écoute) jusqu'à ce que la voile faseye pour un cap donné. L'accent est donc mis sur la chute, en particulier sur son vrillage. Les penons de guindant sont votre repère. Si les penons flottent ou frétillent simultanément, alors le vrillage de votre voile est correct. Si le penon supérieur au vent flotte en premier, vous avez probablement trop de vrillage. Celui-ci se contrôle par la position du point de tire qui tend à se déplacer naturellement vers l'extérieur et vers le bas. Dans certaines situations, comme au petit largue, le point de tire n'a pas besoin d'être extériorisé. Peu d'entre nous possèdent des outriggers comme sur les bateaux 2014-2015 de la Volvo Ocean Race. Donc nous devons nous contenter des padeyes sur le livet et des lignes de twing qui abaissent le point de tire, ce qui équivaut à l'avancer. Si le barreur garde un cap, chaque changement de vitesse de vent et de direction nécessitera de régler l'écoute, puis la ligne de twing, ou de passer la poulie ouvrante sur un autre padeye. Dans toutes les conditions sauf si on est surtoilé, la tension de drisse doit être molle. Ce que l'on recherche est un profil puissant avec un creux reculé. Rappelons qu'au largue un peu de traînée peut s'avérer avantageux. Toutefois, la clé dans ce cas est de contrôler la force de gîte. Des voiles trop creuses et puissantes entraînent une gîte excessive, et donc des angles de barres supérieures à l'optimal, ce qui augmente considérablement la traînée induite[6]. Par conséquent, lorsqu'on est au largue dans la brise, il faut un étai ferme, plus de tension de drisse, plus de vrillage et peut-être moins de tension d'écoute afin de maintenir l'angle de gîte optimal du bateau. Quel est cet angle de gîte idéal ? Le barreur le sentira !

La hauteur du point d'écoute joue ici un rôle clé. Une voile typique de près avec un point d'écoute bas vrille trop dès qu'on choque l'écoute. Voilà pourquoi une voile de largue spécialisée « Jib Top », une voile au point d'écoute haut, est incontournable dans l'inventaire des voiles de large. L'avènement des voiles de portant asymétriques pour les allures serrées a rendu ces voiles quasiment obsolètes.

Course au large

Jusqu'à présent, nous nous sommes concentrés sur les allures de près dans les parcours bananes. La course au large est différente, où il est très rare de naviguer réellement au près avec les voiles bordées au maximum, à moins qu'il ne s'agisse d'une course très courte ou d'une fin de parcours. La VMC, et non la VMG, est la cible, avec pour différences : une VMC est la vitesse à la prochaine marque de parcours, vers la prochaine bascule de vent attendue ou vers des zones de vent plus élevé[7]. Il est rare que la direction de vent réel (TWD) soit stable très longtemps. En conséquence, naviguer au près serré vers une marque qui se trouve à des centaines de milles n'est pas très cohérent. Mieux vaut choquer un peu les écoutes et naviguer du côté du plan d'eau que l'on juge favorable. Par définition, lorsque vous ne bordez pas le foc au maximum, vous naviguez au bon plein.

En théorie, la navigation hauturière au près dans la brise (plus de 25 nœuds) s'apparente à celle au près sur des parcours bananes. Pourtant, la réalité impose une stratégie différente. Pour finir premier, il faut premièrement finir. La prudence suggère alors d'abattre légèrement et d'accélérer sensiblement pour faciliter la progression en mer forte[8]. Si la TWS monte

6 La plupart des bateaux de course modernes tirent profit d'un safran plutôt chargé au largue.

7 Sans instruments pour calculer la VMC, testez simplement deux caps différents. Si le cap A en direction de la bouée donne 8 nœuds de vitesse de bateau, tandis que le cap B, à 10 degrés sous la bouée, donne 9,5 nœuds, votre seuil de rentabilité est le cosinus du delta des angles multiplié par la différence de vitesse. Dans cet exemple, le seuil de rentabilité pour le cap à 10 degrés de la bouée est 0,98 de 1 nœud. Étant donné que le gain en vitesse est de 1,5 nœud, votre VMC sera plus élevée au largue. Assurez-vous autant que possible de vous diriger du côté favorable du plan d'eau.

8 Même en choquant légèrement l'écoute du foc ou de la grand-voile, on diminue considérablement la charge sur ces voiles, et de même sur le mât et la coque.

Un outrigger sur *SCA* durant la Volvo Ocean Race 2014-2015. Sa principale fonction est de réduire le vrillage en écartant le point d'écoute à l'extérieur de la coque. Ceci est particulièrement efficace pour une configuration à deux ou trois voiles d'avant au largue. (Photo Corinna Halloran/Team SCA/ Volvo Ocean Race.)

En face, le classique *Black Watch*, un yawl de 68 pieds signé Sparkman & Stephens et mis à l'eau en 1938. Sur cette photo, le voilier navigue au près lors de l'annuelle New York Yacht Club Regatta, parrainée par Rolex à Newport, Rhode Island. (Photo Billy Black/ Rolex.)

au-delà des 30 nœuds, à part le changement évident dans les voiles ou des ris sur la grand-voile, un objectif clair – aussi étrange que cela puisse paraître – est de minimiser la portance et d'abaisser le CE. Le moyen rapide d'y parvenir est d'utiliser le vrillage, qui permet au haut de la voile d'avant et de la grand-voile d'atteindre un angle d'attaque quasi nul sans que ces deux voiles ne battent et finissent par s'endommager.

Réglage des voiles de croisière

Comme indiqué plus haut, toutes les techniques de réglage qui fonctionnent pour la course s'appliquent à la croisière. Pour le foc, la clé est de contrôler le vrillage, puisque en croisière on navigue rarement au près serré, et donc on borde rarement au maximum. L'intérêt de contrôler le vrillage n'est pas d'améliorer la vitesse, même si vous irez plus vite, mais surtout de préserver vos voiles. Des voiles qui faseyent constamment se fragilisent quel que soit le matériau. Malheureusement, seulement un petit nombre de bateaux de croisière ont la possibilité de contrôler le vrillage du foc aux allures de bon plein ou de grand largue. La solution la plus simple semble être la ligne de twing. La poulie serait positionnée pour permettre un réglage optimal au près serré. La ligne de twing serait utilisée pour abaisser l'écoute et avancer le point de tire en l'extériorisant légèrement pour contrôler le vrillage excessif. Cette technique fonctionnera, que l'on ait un foc à enrouleur ou non. Pourtant, votre maître-voilier devrait vous avoir mis en garde contre une utilisation excessive du système à enrouleur partiel. Bien qu'il soit pratique et en dépit de renforts supplémentaires, ce système use prématurément la voile. Enfin, lorsqu'on est surtoilé, il est préférable de prendre exemple sur les voiliers de course high-tech : en naviguant très haut avec votre voile relativement grande et creuse. C'est bien mieux que de naviguer bas avec des voiles surbordées.

US71

43
ROLEX

Les voiles de portant

Quelle est la différence entre un char à glace et un voilier ? En se référant à la formule « le support fait le message » de Marshall McLuhan, intellectuel canadien (1911-1980), on trouve la réponse à la question. Un char à glace navigue sur la glace, un bateau sur l'eau. Un char à glace n'a jamais besoin de voiles de portant : sa vitesse, moins contrainte par les frottements, propulse le vent apparent suffisamment vers l'avant à tout moment.

Ces spinnakers A2 sur des C&C 30 sont dans leur plage d'utilisation idéale à environ 12-13 TWS, où la puissance maximale au bon angle VMG portant est nécessaire. Notez les penons de guindant sur 30007, indiquant une tension d'écoute parfaite. Et notez les deux formes différentes de renforts d'amure sur ces voiles A2, conçus pour distribuer les charges dans les coins. (Photo Daniel Forster/Rolex.)

En face, *Wild Rose*, un Farr 29 de 43 ans, précédemment connu sous le nom *Wild Oats*. Ce bateau, équipé d'un A4 North, a remporté la Sydney Hobart en 2014, en temps compensé. L'inventaire des voiles de portant North de Hickman, utilisé à 80 pour cent du temps, comprenait un A1.5, un A3 et un A4. Le fait qu'il n'y ait pas d'A2 dans cet inventaire reflète les conditions de vent musclées et les allures plutôt de largue dans cette course, la plus difficile des régates de longue distance. En fait, la force du vent pour des bateaux de petite taille comme *Wild Rose* variait entre un minimum de 10 TWS et un maximum de 35 TWS lors de cette édition.

Considérons à présent les catamarans AC 72 utilisés dans la 34e Coupe de l'America à San Francisco en 2013. Quand ces bateaux volent, c'est-à-dire qu'ils soulèvent leurs coques hors de l'eau et glissent avec une faible traînée hydrodynamique sur deux petits appendices (les foils), ils ne nécessitent pas de voiles de portant de la même manière qu'un bateau conventionnel. Tout comme les chars à glace, la plage de leur angle de vent apparent (AWA) au portant est très étroite. Aussi, les quelques voiles de portant requises pour les multicoques de haute performance d'aujourd'hui sont très différentes à bien des égards de ce qu'un marin de niveau intermédiaire considère être un spinnaker.

De nos jours, il existe au moins trois catégories de formes de voiles de portant : voiles de croisière, voiles de course (sur les bateaux avec tangons traditionnels) et spinnakers asymétriques pour voiliers de course de haute performance, y compris les multicoques. Les spinnakers peuvent être également divisés en deux groupes principaux : symétriques (Spi) ou asymétriques (Asy).

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les voiles de portant, à commencer par les spinnakers. Le portant étant l'allure à partir de laquelle un foc ou un génois n'est plus efficace.

Histoire des voiles de portant

On raconte qu'en 1865 des marins anglais eurent l'idée de concevoir une voile plus grande et plus légère qu'un génois tangonné pour les allures de portant. Cette trouvaille, comme la plupart des grandes inventions, semblait tomber sous le sens. Quant au nom spinnaker, il repose sur une légende d'un livre du Britannique Tom Draper écrit en 1939, qui relate qu'un membre de l'équipage était tellement impressionné par les dimensions de la voile qu'il déclara : « That ought to make her spin » (cela va faire perdre le contrôle du bateau), d'où l'appellation de *spin-maker* puis spinnaker. Toutefois, la véritable histoire des voiles de portant reste une énigme. Leur apparition pourrait remonter à bien plus loin encore. En 1812, John T. Shubrick, alors cinquième lieutenant de la frégate américaine *Constitution*

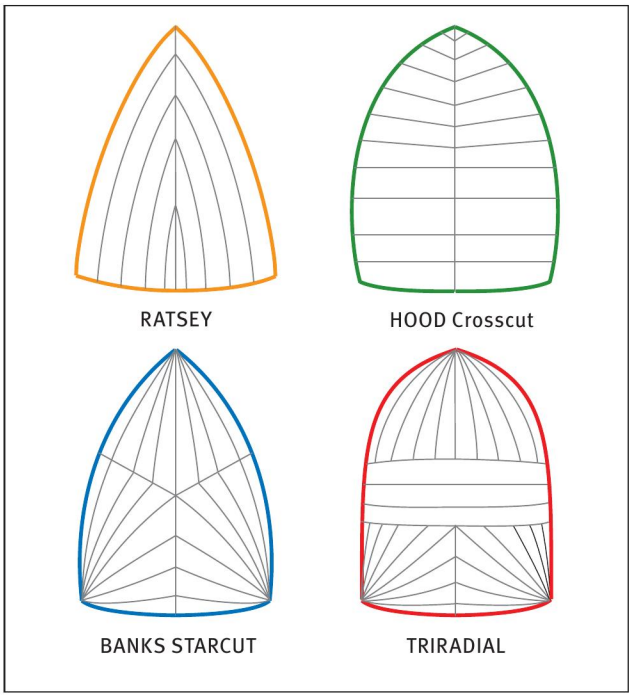


Figure 9.1 Ces voiles représentent les étapes importantes dans le design des spinnakers antérieur à 1975. En haut à gauche, il s'agit du premier spinnaker symétrique fabriqué par Ratsey & Lapthorn dans les années trente. En haut à droite, c'est une coupe à laizes horizontales de Hood Sailmakers du début des années cinquante (breveté par Hood), conçue pour maximiser la surface projetée. En bas à gauche, la coupe radiale Starcut de Bruce Banks pour le bon plein, créée en 1969, et en bas à droite, la coupe triradiale conçue en 1973. À la fin des années quatre-vingt, et au début des années quatre-vingt-dix, les spis asymétriques, ou Asy, sont devenus la norme en régate comme en croisière. Ils prédominent à ce jour.

(aussi connue sous le nom de *Old Ironsides*), écrivit dans le journal de bord : « De minuit à 4 heures du matin, dans des brises modérées et une couverture nuageuse épaisse suivie de précipitations à 1 heure du matin, la grand-voile était hissée. Puis à 3 h 30 du matin, le spi était gonflé, et la grand-voile établie. »

Alors que l'aérodynamique était à ses débuts à la fin du XIX^{e} siècle (rappelons que les frères Wright n'ont réussi le vol habité qu'en 1903), on avait déjà saisi deux grands principes sur les voiles de portant : un matériau léger était préférable, et l'objectif était de ralentir l'écoulement du vent. On croyait aussi, bien à tort, que plus c'était grand, mieux c'était. En fait, les premiers spinnakers étaient asymétriques : simplement une évolution du foc ou du génois. C'est l'un des nombreux cas où l'Histoire est un perpétuel recommencement : les voiles Asy de portant sont la tendance évidente de nos jours.

Dans les années trente, la voilerie Ratsey & Lapthorn fabriqua le premier spi symétrique (fig. 9.1). À l'époque, tout comme aujourd'hui, le défi était de contrôler l'allongement du tissu. Et, durant les années de coton, ce n'était pas une tâche aisée ! La solution que proposait Ratsey était d'assembler une série de panneaux en forme de V à l'envers dans le but d'aligner les longs fils de chaîne du panneau avec la charge provenant des coins. Bien que cette innovation soit un développement important dans l'histoire des voiles de portant, le spinnaker Ratsey différait peu d'un foc triangulaire. Il avait un volume plus important.

Au début des années cinquante, Ted Hood inventa le spinnaker crosscut en alignant les fils transversaux avec les charges. Son but était d'augmenter la surface projetée afin de générer de la traînée. Grâce à des tests approfondis en temps réel, Hood prouva que le spi crosscut avec ses épaules généreuses, mais de surface totale identique, était bien plus rapide. À l'époque, cependant, la bête noire des dessinateurs de spinnakers symétriques était l'extrême élasticité le long de la couture médiane : la couture qui longe verticalement le milieu de la voile. Le problème persistait malgré l'apparition de nouveaux matériaux synthétiques moins élastiques. Finalement, on doit la solution à la voilerie Bruce Banks qui, en 1969, développa la coupe en étoile. Cette configuration, uniquement réservée aux voiles de largue, était composée de panneaux radiaux qui partaient des trois coins de la voile, éliminant ainsi la couture médiane sur toute la hauteur. Il s'agissait ainsi de la première voile à coupe radiale intégrale. Peu après, une autre voilerie, Hard Sails, appliqua ce concept seulement à la partie haute de la voile en conservant la partie basse en coupe horizontale propre à Hood. Enfin, North et d'autres voileries combinèrent les trois idées pour aboutir à un spinnaker triradial tel qu'on le connaît aujourd'hui malgré quelques subtiles évolutions : une tête radiale, une section du milieu à coupe horizontale et des points d'écoute radiaux. En résumé, cette disposition exploite au mieux les propriétés des matériaux pour minimiser l'allongement, maximiser la surface projetée et créer une voile symétrique avec la plus grande plage d'utilisation possible.

Dans les années quatre-vingt, deux marins originaires de Sydney en Australie, et pratiquant le 18 pieds australien, abandonnèrent l'utilisation compliquée du tangon en attachant l'amure du spinnaker à un bout-dehors qui prolongeait l'étrave du bateau. Cette solution fut adoptée en raison des angles de vent serrés auxquels naviguent les 18 pieds, à la manière d'un AC72 ou d'un char à glace. Comme le tangon était toujours appuyé contre l'étai, il semblait logique de conserver cette position de manière permanente ou rétractable. Le guindant pouvait être alors allongé et, par conséquent, être plus long que la chute. C'est ainsi que le spinnaker asymétrique fit son retour. Le J105 était le premier bateau moderne de série à disposer d'un bout-dehors. Les régatiers des années quatre-vingt et du début des années quatre-vingt-dix se souviennent du débat sur les avantages d'un spi asymétrique par rapport à un spi symétrique. Certains avançaient qu'une voile asymétrique déventait pendant l'empannage et faisait perdre de la vitesse. Toutefois, le spi asymétrique évolua et prit rapidement l'ascendant sur le spi symétrique de trente ans son aîné, à tel point que rares furent les bateaux de course construits avec un tangon après 1995. Peu après, l'utilisation des spis asymétriques se généralisa, y compris sur les croiseurs.

Au cours des trente dernières années, les formes et les matériaux des spis asymétriques ont été nettement améliorés, tout comme les carènes rapides que l'on trouve sur les bateaux de régate et même de plaisance. Toutes ces évolutions ont sensiblement modifié les allures des polaires : représentations graphiques de la vitesse du bateau en fonction de l'angle de vent réel à vitesse de vent réel fixe. Pour une vitesse de vent donnée, la polaire indique le meilleur compromis en termes d'angle de vent réel (TWA) et de vitesse bateau à toutes les allures[1].

L'aérodynamique des voiles de portant

Au premier abord, la notion d'aérodynamique au portant paraît bien plus simple que celle au près, peu intuitive, où l'on se retrouve pris entre le vecteur aérodynamique du plan de voilure et le vecteur hydrodynamique sous l'eau. Au vent arrière pur, il suffit de ralentir l'écoulement (le vent que perçoit les voiles) pour créer de la traînée. Ce vecteur « traînée » pousse le bateau dans l'axe de la TWD (direction du vent réel). En théorie, on néglige la portance, le principe de circulation ou la précision de l'angle d'attaque. Si seulement la réalité pouvait être simple. Il y a une vingtaine d'années environ, au moment de la parution de la première édition de ce livre, c'était le spinnaker AP (All Purpose) en 0,75 oz (1 oz US = 1 smoz = 42,8 g/m^2) qui prévalait parmi toutes les voiles de portant. Étant donné les allures très abattues auxquelles naviguaient alors les bateaux, le rôle principal de ce spi AP était de générer de la traînée et de décélérer l'écoulement d'air.

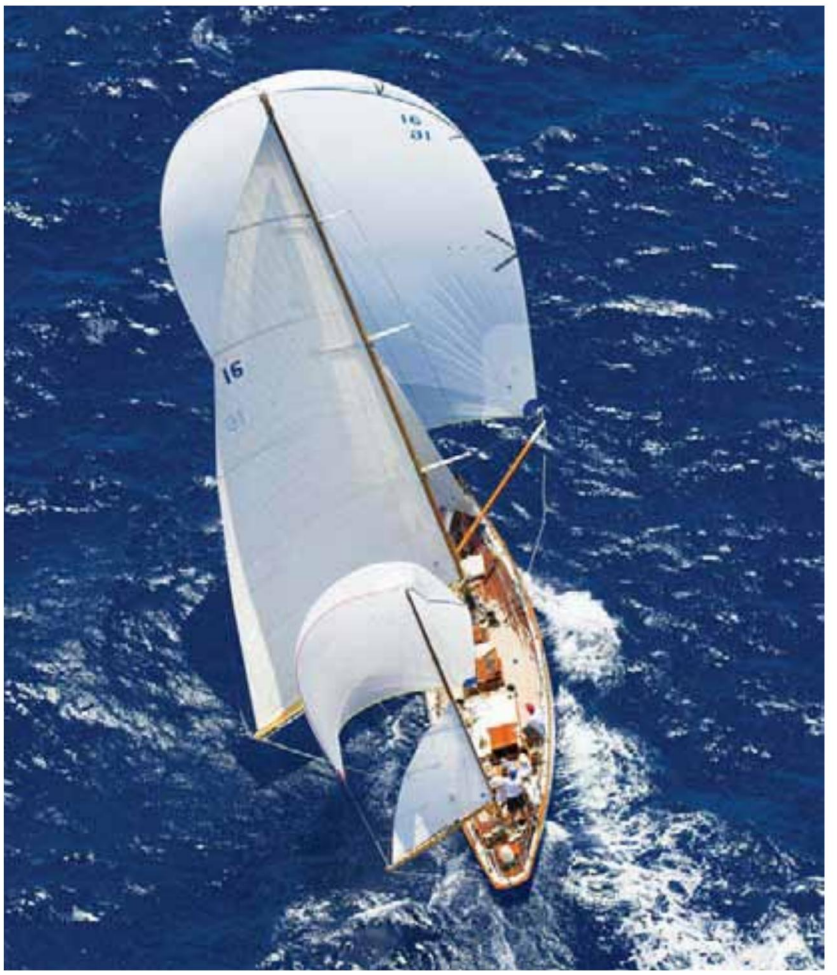
Sur les voiliers de course modernes, ces AP sont de l'histoire ancienne. Les bateaux ont évolué, contraignant les voileries à s'adapter. Aujourd'hui, à longueur égale et pour une force de TWD donnée, les unités de compétition sont bien plus rapides. Comme expliqué précédemment dans le chapitre sur l'aérodynamique, les AWA plus serrés nécessitent des voiles plus plates. De ce fait, les voiles de portant sont plus à même de générer de la portance en plus de la traînée. D'ailleurs, sur les AC72 ou sur d'autres multicoques rapides parfois appelés « machines à créer du vent apparent », les voiles de portant sont conçues pour optimiser la portance. En d'autres mots, elles fonctionnent comme des voiles d'avant classiques. Ironiquement, ces dernières s'apparentent plus aux voiles imaginées par les marins anglais de la fin du XIX^e siècle, à savoir très plates et certainement plus raffinées.

Dans notre analyse de l'aérodynamique au portant, on distinguera deux allures. La première est la VMG au portant qui correspond à la vitesse de rapprochement à la bouée sous le vent. C'est une combinaison de vitesse bateau et d'angle entre le cap du bateau et la route directe à la bouée sous le vent (alors que la VMG au près représente la vitesse de rapprochement à la bouée au vent). La deuxième allure comprend toutes les allures de largue. Dans ce cas, le TWA est plus ouvert que pour le près, mais plus serré que l'angle VMG au portant. Pour la plupart des bateaux modernes, l'angle TWA optimal dans 12 TWS, par exemple, se situe entre 142 et 148 degrés[2]. Le largue en général couvrira des angles entre 50 TWA et l'angle de VMG au portant.

Le J105, introduit en 1991, était le premier bateau de série avec un bout-dehors rétractable. Si, par exemple, votre vitesse à un TWA de 145 degrés est de 10 nœuds, la VMG à la marque sous le vent, en supposant qu'elle soit plein vent arrière de votre position actuelle, est le cosinus de la différence entre votre cap et 180 degrés multiplié par la vitesse actuelle du bateau. Dans cet exemple, votre VMG serait de 8,19 nœuds. Une VMG optimale est la vitesse VMG la plus rapide à la marque, tandis que l'angle TWA VMG optimal est l'angle TWA le plus rapide à la marque. Ainsi, la vitesse cible au portant est la vitesse la plus rapide à la marque. Dans le médium pour un bateau de course moderne, cet angle cible de TWA est environ de 145. La vitesse qui correspond à cet angle peut être dérivée des polaires du bateau. Ainsi, la méthode la plus simple pour déterminer le cap le plus rapide au portant est de faire correspondre la vitesse cible à la vitesse réelle. Photo prise lors de la Rolex Big Boat Series à San Francisco. (Photo Daniel Forster/Rolex.)

1 Voir la figure 3.4 à la page 58 pour un diagramme polaire représentant les vitesses prédites d'un bateau, basé sur un programme de prédiction de vitesse (VPP). Ce schéma montre toutes les allures et les directions de vent.

2 Certains bateaux plus anciens équipés de spinnakers ont un angle de vent réel (TWA) optimal de 170. *Emirates Team New Zealand* a établi un record le 28 juillet 2013 avec une pointe de vitesse à 44,15 nœuds (81 km/heure, 50 milles/heure) dans un vent de 15,8 nœuds, soit 2,79 fois la vitesse du vent. Les chars à glace peuvent aller jusqu'à 5 fois la vitesse du vent.



Dorade arbore des spis symétriques, alors vainqueur de la Transpacific Yacht Race en 2013. Ce voilier de 52 pieds dessiné par Olin Stephens a également gagné cette course en 1936. Plus tôt, *Dorade* avait remporté la Transatlantic Race de 1930, permettant à son jeune créateur et à son frère Rod Stephens Jr. de se faire un nom dans le milieu. (Photo Sharon Green/North Sails, LLC.)

Rappelons que dans le cas d'un spi symétrique, le guindant et la chute ont une forme identique sur le dessin, alors que leurs formes volantes sont très légèrement modifiées par la hauteur du tangon relativement à celle du point d'écoute et par la différence de pression sur la voile. En revanche, la conception des spis asymétriques s'apparente à celle des voiles de près. Leur chute vrille pour s'adapter au gradient de vent à la manière des focs, des génois et des grands-voiles. Cette caractéristique est rendue possible par une courbure asymétrique du guindant à la chute. Est-ce compatible avec le concept de surface projetée, prôné par Ted Hood comme facteur de performance au VMG portant ? Oui et non. En effet, les dessinateurs perfectionnent sans cesse les formes pour accroître la surface projetée du guindant et faire pivoter la voile au vent, ce qui permet d'utiliser plus efficacement la force éolienne. En ce qui concerne la chute, l'objectif est d'obtenir le bon profil de vrillage. Il s'agit de jouer à la fois sur les sections horizontales et la distribution de volume verticale. En conclusion, les spis symétriques et asymétriques fonctionnent selon les mêmes principes, mais ils se comportent différemment.

Nous avons vu qu'il suffit au voilier de dévier la direction de l'écoulement pour créer de la portance. C'est la raison pour laquelle une simple planche en bois permet à un voilier de remonter au vent. Cette même planche pourrait faire office de voile de portant simplement parce qu'elle créerait une traînée de pression équivalente à la force propulsive principale entre 150 et 180 TWA. Elle pourrait aussi produire de la portance entre 60 et 150 TWA. Et avec des AWA inférieurs à 90 degrés, la portance ainsi générée serait suffisante pour contrer la traînée et propulser le bateau. Alors, quelle est la meilleure combinaison de portance et traînée pour les spis symétriques et asymétriques ? Souvenez-vous des deux principaux types de traînées : la traînée de frottement et la traînée induite. La première est créée par l'air qui contourne un objet. La deuxième représente l'énergie dépensée pour créer les tourbillons de chute et les tourbillons marginaux engendrés par la différence de pression entre l'intrados et l'extrados de la voile.

Aux allures de VMG portant, on distingue un troisième type de traînée que l'on appelle traînée de profil ou encore traînée de pression. On n'a jamais fait allusion à ce terme dans l'aérodynamique au près. C'est parce que la traînée de pression caractérise un écoulement décroché, la bête noire pour les allures de près et plus encore pour les concepteurs d'ailes d'avion. En quelques mots, lorsque l'angle d'attaque devient trop important, on observe un écoulement de recirculation substantielle entre le guindant et la chute sur l'intrados du spinnaker. Plus l'angle d'attaque est élevé, plus la recirculation est importante. En conséquence, la couche limite se sépare de la voile depuis le guindant. On parle d'écoulement décroché. Dès lors, les dessinateurs de voiles de portant, particulièrement pour les anciens bateaux comme *Dorade* (photo ci-dessus), doivent comprendre et exploiter la traînée de pression afin d'atteindre la meilleure VMG au portant. Cette notion est d'autant plus critique lorsqu'on navigue bas. En outre, au VMG portant, même un spi asymétrique sur un monocoque moderne rapide génère de la traînée, surtout dans sa partie basse qui influe moins sur le moment de gîte. Néanmoins, cette voile doit aussi créer de la portance, notamment dans sa partie haute où le vecteur de la force de portance se rapproche le plus du cap du bateau. De ce fait, le dessinateur doit prendre en compte le moment de gîte.

Prenons l'exemple de deux bateaux qui naviguent dans 14 TWS à leur VMG portant optimal, tous deux sous spi asymétrique. Imaginons que le bateau A a été dessiné au début

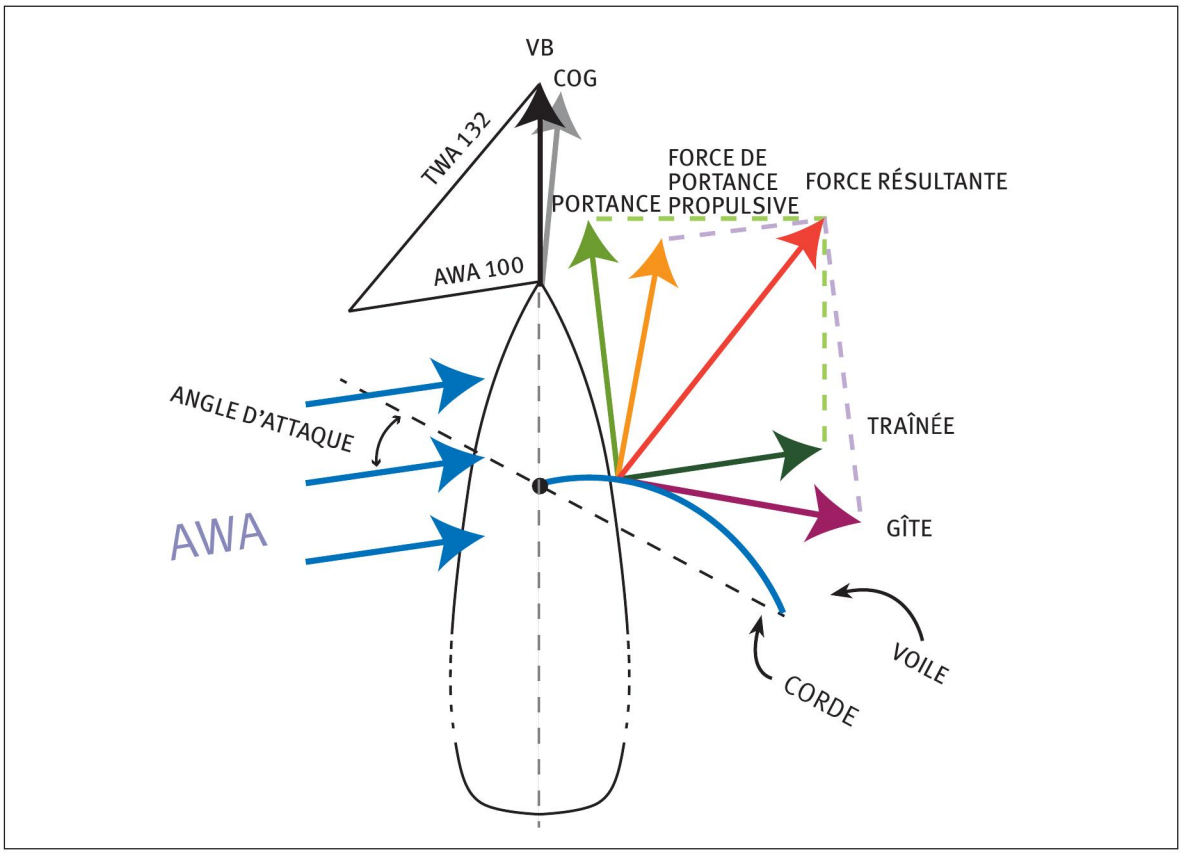


Figure 9.2. VB représente le vecteur vitesse du bateau, tandis que COG est la route sur le fond, la différence entre les deux étant la dérive. La grand-voile est réglée plus ou moins pour un AWA de 100 avec l'écoulement du vent apparent en bleu clair. Le vecteur de la force de traînée, par définition toujours parallèle à l'AWA, est en vert foncé. Le vecteur de la force de portance, environ 1,3 : 1 du vecteur traînée, est en vert clair et est toujours perpendiculaire à l'AWA. Le résultat de ces deux vecteurs est le vecteur aéro de force résultante, représenté en rouge. Le vecteur force de gîte, en violet, correspond à la force latérale sur le plan de voilure induite par la pression du vent. L'effet aérodynamique net sur le bateau est représenté par le vecteur jaune, qui est la force propulsive du plan de voilure. Dans cet exemple fictif, la force propulsive est proche de la force résultante et de la force de portance parce que la force de traînée dont la direction est inférieure à 90 pour cent de l'axe du bateau a une composante de force propulsive.

des années quatre-vingt selon l'ancienne jauge IOR. Sa carène, son déplacement et ses appendices seraient typiquement optimisés pour des angles de portant d'environ 160 TWA. La traînée aérodynamique est alors primordiale, puisque l'AWA (autour de 120) et, du même coup, le vecteur de traînée sont très proches du cap du bateau. À l'opposé, considérons un monocoque moderne qui répond à des jauges haute performance et navigue à 143 TWA dans la même force de vent que notre bateau IOR. Son AWA est, par conséquent, bien plus serré aux alentours de 95. À cet angle, la traînée contribue à la force propulsive et à la VMG. Elle est donc souhaitable. Cependant, si les arrières des sections de la voile n'étaient pas aussi plats et vrillés, on aurait pour conséquence une gîte excessive et un angle de safran plus important dont la traînée freinerait le bateau et augmenterait le risque de départ au lofe.

Un diagramme vectoriel aide à comprendre les forces en présence dans des conditions de portant typiques (fig. 9.2). La traînée est la composante la plus simple à appréhender. Elle est logiquement dans la direction du vent apparent. La portance aérodynamique est, elle, perpendiculaire à l'AWA, le vent que le bateau perçoit en navigation. Par ailleurs, plus le TWS est élevé, plus on dispose d'énergie éolienne pour alimenter à la fois la traînée et la portance. Tout comme au près, la force latérale ou force de gîte est une résultante de l'énergie du vent et contribue largement à la vitesse au portant. La capacité de contrecarrer la force de gîte est une des raisons pour lesquelles un AC72 ou un AC48 de la Coupe de l'America 2017 sont si rapides. Un AC72, par exemple, mesure 14 mètres de large. Au près, la traînée tend à dévier le bateau de son cap ; c'est-à-dire que la force latérale est supérieure à la force propulsive. Les appendices – la quille, la dérive, le safran et le voile de quille – s'opposent à cet effet et poussent le bateau au vent (40 TWA). On observe un phénomène similaire au largue sur un ancien bateau ou au VMG portant sur un bateau de course moderne ou un multicoque. Dans tous ces cas, l'AWA est inférieur ou égal à 90 degrés et tend à dévier le bateau de son cap. Ainsi, pour s'opposer plus efficacement à la force de traînée, le vecteur de portance doit être plus important. Compte tenu des effets négatifs d'une force de gîte accrue, augmenter la portance ne peut se résumer à une augmentation de la taille du gréement ou des voiles. Face à ces AWA plus serrés, la solution est alors d'aplatir les voiles qui génèreront quasiment autant de portance, mais considérablement moins de traînée. Aux allures plus

abattues – fait rare pour vaisseaux à faible traînée comme le char à glace et l'AC72 –, le creux des voiles peut progressivement augmenter à mesure que l'AWA se rapproche du cap du bateau et que, par conséquent, la contribution de la traînée prend le pas sur celle de la portance.

La figure 9.2 décrit une situation au portant où le TWA est légèrement plus serré que l'angle VMG optimal (ou la vitesse cible). Le triangle des vitesses de vent pour 132 TWA et 7 nœuds de vitesse de vent impose un AWA de 100 degrés. Les diverses forces en présence sont décrites dans la légende. La résultante de ces forces est le vecteur de la force propulsive. Ce dernier est plus ou moins dans la direction de déplacement si l'on fait abstraction de la dérive. Il n'est pas directement lié à la vitesse du bateau puisque les forces hydrodynamiques ne sont pas prises en compte dans ce bilan des forces aérodynamiques. Si l'on s'intéresse désormais à ce même bateau au largue à 70 AWA par exemple, la portance sera supérieure alors que la traînée diminuera parce qu'on se rapproche du mode de fonctionnement au près.

Rappelons qu'au près le rapport portance/traînée est d'environ 8 :1. Au petit largue, il est plutôt de l'ordre de 5 :1, alors qu'au portant comme sur la figure 9.2, ce ratio serait autour de 1,5 :1. Notez que théoriquement, au portant pur (180 AWA), la portance serait nulle, et on n'aurait que de la traînée. Si on avait représenté un ancien bateau de course, sa VMG optimale serait autour de 160 TWA, ce qui signifie un rapport portance/traînée de l'ordre de 1 :1. Sur la figure 9.2, la force propulsive est supérieure à la portance, car l'angle de la composante de traînée est inférieur à 90 degrés de l'axe du bateau. Et, par conséquent, elle s'additionne à la portance.

L'inventaire des voiles de portant

Les appellations des jeux de voile de portant des années cinquante, à l'époque où les premiers spinnakers modernes firent leur apparition, sont encore évoquées de nos jours : All purpose 0,75 oz, 0,5 oz, reacher, 1,5 oz et le heavy air runner. De manière générale, on faisait référence au grammage du tissu pour les différencier parce que leur forme était assez similaire. Désormais, on utilise plus couramment des termes comme Code 0, FR0, BR0, R1, R2, A1, A1.5, A2, A3, A4, A5, et même A7. Du fait des limitations du nombre de voiles à bord dans la plupart des courses au large, il est quasiment impossible d'embarquer ne serait-ce qu'une partie de cet inventaire pléthorique de voiles de portant. En théorie, il serait bon d'avoir toutes ces voiles à sa disposition et d'en choisir entre trois et cinq en fonction des conditions météo escomptées. En réalité, c'est inutile et incommode.

À présent, nous allons tenter de donner une description générale de ces termes, même s'ils ne font pas tout à fait l'unanimité dans le monde de la voile. Pour les bateaux modernes rapides à coque planante, les voiles de portant peuvent être classées en deux catégories : les asymétriques spi Asy et les Code 0.

Les spi Asy correspondent à l'angle de VMG et à certains angles un peu plus lofés. Par exemple, l'A1 pour le VMG portant dans le petit temps, et l'A2 pour le VMG portant dans le médium et la brise. L'A1.5 couvre les TWS entre l'A1 et l'A2. L'A1.5 se situe entre les deux en termes de TWS. L'A4 entre en action à partir d'environ 22 TWS au VMG portant. Les A3, A5 et A7 (à noter que plus le chiffre augmente, plus la plage de vent est haute) sont conçus pour des allures plus lofées que le VMG. Dans les conditions d'utilisation de l'A7, on regretterait presque parfois d'avoir hissé un spi.

On distingue également deux catégories principales pour les Codes 0, et ils ne sont utilisés qu'au large, jamais sur des parcours bananes. Sur les anciens bateaux qui naviguent assez bas, on trouve des Codes 0 assez volumineux avec une largeur au milieu comparable à un spinnaker et qui, par conséquent, compte pour un spinnaker dans les jauges[3]. Les bateaux modernes qui naviguent à des AWA plus faibles seront à leur avantage avec des Codes 0 plus plats. Dans cette famille, on distingue le FR0 (Code 0 fractionnel de largue) qui est une voile assez plate pour les allures plus lofées dans la brise. Parfois, pour les plus grands bateaux de course, ils sont nommés Rs (reachers) comme R1, R2, etc. Typiquement,

3 D'après les jauges à handicap, si la section du milieu représente plus de 75 pour cent ou plus de la bordure d'une voile, cette voile est considérée comme un spinnaker.

Lors de la première étape de la course de 1997-1998 sur le Trophée Volvo, connu aujourd'hui sous le nom de la Volvo Ocean Race, le voilier *EF Language* a dévoilé une voile asymétrique pour les allures de largue serrées, développée par North et appelée « Code Zero ». *EF Language* a gagné la course en emportant trois manches sur neuf. Cette photo plus ancienne de TP 52 illustre l'avantage dont a joui *EF Language* pendant la Volvo. Notez que le TP en tête est le seul doté d'un Code 0, la voile qui s'adapte bien entre un foc et un reacher 3A omniprésent. Ce Code 0 génère une puissance supplémentaire à environ 40 degrés d'AWA dans des vitesses TWS autour des 9-12 nœuds. (Photo North Sails, LLC).

ces Rs sont utilisés à des angles encore plus serrés que les FR0. On trouve ensuite le BR0 (Blast Reacher Code 0). Il s'agit d'une voile plus petite et plus plate que le FR0 avec moins de positif de rond de chute et une bordure plus courte pour malgré tout satisfaire la règle des 75 pour cent de largeur du milieu de la voile. Elle compte ainsi pour un spi dans les jauges. Elle est destinée aux allures de travers et largue dans la forte brise.

De manière générale, les FR0 et BR0 ont remplacé les A5, A7 et les Jib Tops, mais certaines exceptions persistent[4]. Typiquement, les jauges limitent les bateaux de 50 pieds à n'embarquer qu'un maximum de quatre voiles de portant et autant de voiles de près. North a développé le Code 0 pour la Volvo Ocean Race de 1997-1998. L'objectif était de concevoir une voile plus adaptée aux angles de vent plus serrés que ces bateaux affectionnaient. Le Code 0 était un mélange d'une voile d'avant et d'un spi asymétrique doté de plus de rond de chute et d'un volume plus important pour supporter ce rond de chute. Cette surface supplémentaire sur la chute battait au vent essentiellement malgré de récentes améliorations. Pourtant, cette voile était d'emblée clairement plus rapide. Pourquoi ? D'abord le Code 0 minimisait la traînée grâce à sa chute très vrillée ; ensuite, il générait également plus de force totale par sa plus grande surface, et enfin la force de gîte restait acceptable parce que la voile était plate et vrillée dans le haut.

4 Il existe de nombreuses exceptions. Par exemple, sur les grands bateaux rapides, un FR0 aura une section milieu inférieure à 75 pour cent de la bordure et sera donc considéré comme une voile d'avant. Pourtant, sur les bateaux plus petits et plus lents qui naviguent à des angles plus abattus, un FR0 pourrait avoir une section milieu supérieure à 75 pour cent. Le terme MHG (*Mast-Head Genoa*) est semblable à un R1. Il est utilisé au près dans le petit temps ou pour les allures débridées dans des conditions de vent très ventées pour la course au large.

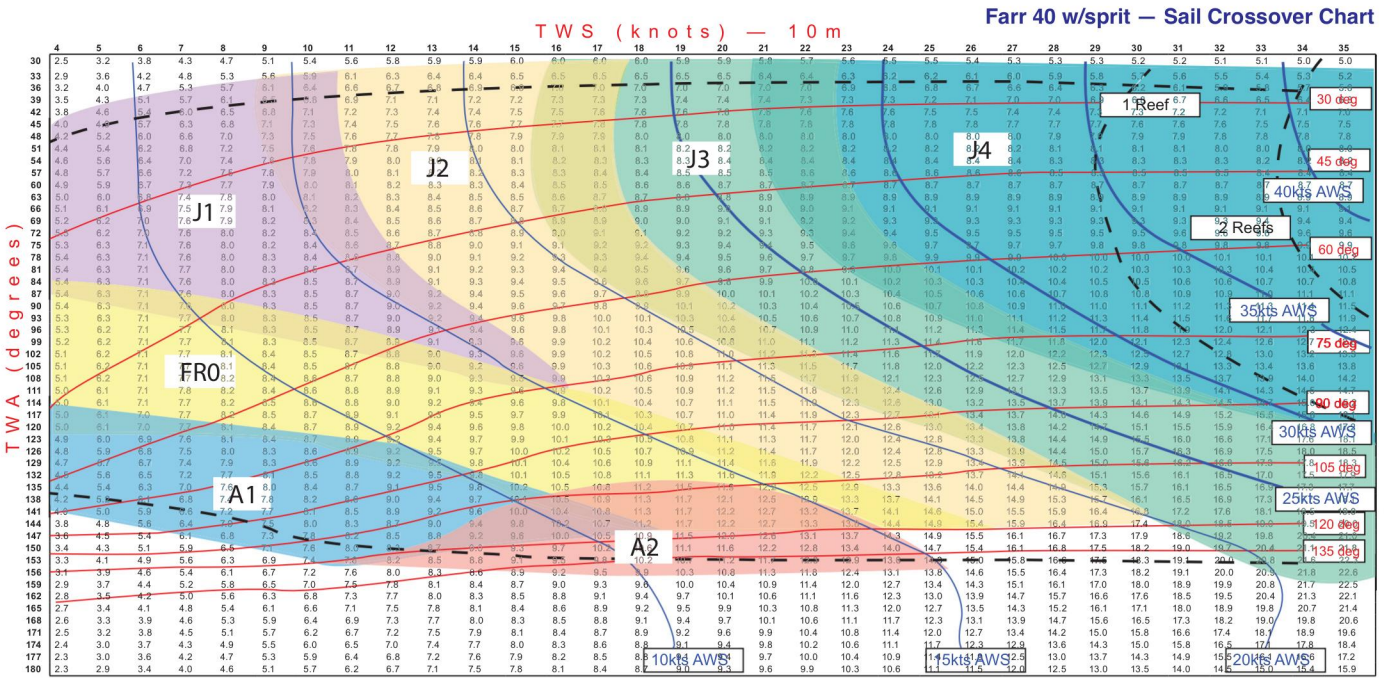


Figure 9.3 Le tableau ci-dessus représente la plage de vent, en termes de vitesse et d'angle, dans laquelle toutes les voiles de l'inventaire doivent être utilisées. Il s'agit d'un voilier de compétition de 40 pieds (12,2 mètres) de 2014. Il est clair que chaque voile possède sa plage optimale, assez étendue, on l'espère, mais optimale quoi qu'il en soit. Notez que certaines voiles ont une plage de vitesse de vent restreinte tandis que d'autres ont une plage d'angle de vent étendue. Les parties ombrées indiquent un chevauchement raisonnable entre les zones. Les lignes rouges représentent l'AWA, alors que les lignes bleues définissent l'AWS. Les lignes qui nous intéressent tout particulièrement pour le parcours banane sont celles en gros pointillés qui représentent l'angle de VMG pour chaque vitesse de vent, avec le près en haut et le portant en bas. Par exemple, les conditions idéales de VMG pour le spi A2 sont d'environ 14 TWS et 145 TWA.

Aujourd'hui, le Code 0, qui se décline en plusieurs variantes, est très répandu sur les bateaux de course au large et de croisière hauturière. En fait, comme c'est souvent le cas pour les innovations majeures, il s'est généralisé à d'autres applications. On le retrouve désormais sur des bateaux de plaisance pour le petit temps, dérivés des A1, A2 et A3, et il se nomme G1, G2 ou G3 (gennaker). Le schéma ci-dessus représente un crossover de voiles pour un bateau de course de 40 pieds[5]. En face, ce même graphique pour un bateau de 38 pieds de course-croisière. On remarque d'emblée que la plage de TWA pour chaque voile de portant est bien plus restreinte sur un bateau moderne que sur un bateau ancien. C'est la capacité d'aller beaucoup plus vite pour une longueur à la flottaison et une TWS données qui explique pourquoi ces voiles de portant sont bien plus spécifiques que les spis AP largement répandus il y a une vingtaine d'années. C'est aussi l'une des raisons pour lesquelles les bateaux modernes sont si exigeants pour les équipiers. Ils nécessitent beaucoup plus de manœuvres en fonction des variations de TWS et TWA sur des courses au long cours. Dans les régates in-shore, les équipes peuvent disposer d'un grand choix de voiles à terre, mais elles ne sont autorisées à embarquer à bord qu'un nombre limité par la jauge. De fait, le choix de l'inventaire à bord en fonction des conditions attendues pour la journée s'avère parfois plus crucial que la voile utilisée pour la course.

Les tissus pour voiles de portant

Les spinnakers, qu'ils soient symétriques ou asymétriques, sont fabriqués en nylon depuis plus de cinquante ans. Certes, l'évolution de ce tissu n'a pas été aussi spectaculaire que celle du tissu pour voiles de près qui ont bénéficié des matériaux composites thermoformés, mais elle a tout de même été sensible. En 1979, le nylon orienté chaîne a été introduit pour répondre aux attentes spécifiques des coupes triradiales. On a augmenté le nombre de fils de chaîne pour ainsi réduire l'allongement et les déformations. Cela a permis d'étendre la plage d'utilisation.

Une seconde avancée notable, au début des années quatre-vingt, était l'ajout d'un enduit de finition plus substantiel sur le tissu. La réduction de l'allongement qui en découlait, bien que moins importante que celle liée à l'augmentation du nombre de fils tissés, était réelle, et

5 Combiné à un programme de routage perfectionné comme Expedition, où la voile correcte pour chaque bord de parcours est automatiquement affichée.

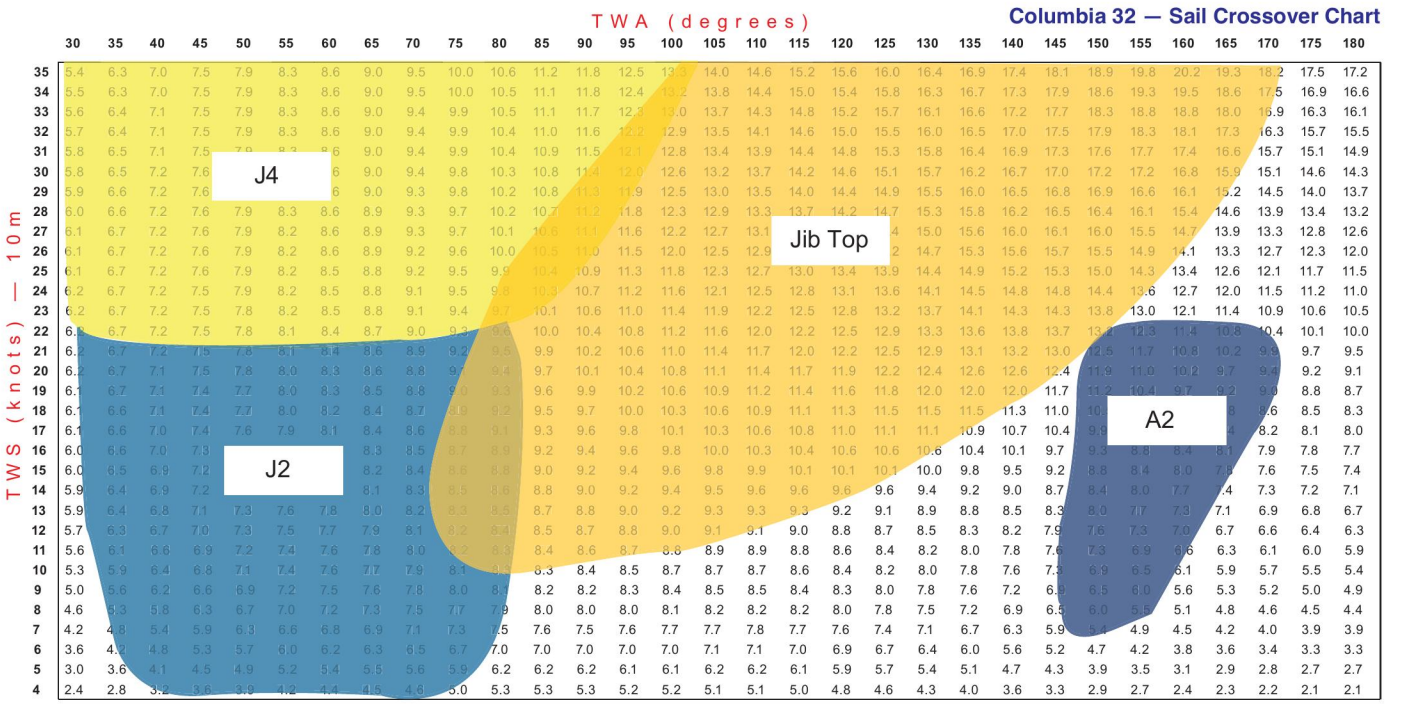


Figure 9.4 Tableau d'utilisation des voiles pour un croiseur de course. Il est intéressant de comparer la simplicité relative de ce graphique avec le précédent (en face) représentant un voilier de course Grand Prix.

tout particulièrement sur le biais, c'est-à-dire à la diagonale de la direction des fils. Les nylons ne sont ni tissés aussi serrés que le Dacron, ni autant chauffés (le traitement à température élevée resserre le tissage du Dacron). Ainsi, et malgré les progrès des enduits de finition, le nylon reste sujet à un allongement assez important sur le biais. Les grands spis sont composés de nombreux panneaux (ou laizes) radiaux étroits qui partent des coins de la voile pour réduire l'allongement. Dans ce cas de figure, les fils les plus solides et les moins élastiques sont orientés selon les charges principales. Aussi, les voiles de portant en nylon sont généralement disponibles en quatre grammages de tissu. Les plus courants sont le 0,5 oz, 0,75 oz, 1,5 oz et 2,2 oz (soit environ 20, 35, 65 et 95 g/m^2). En fait, le poids du tissu fini est environ 10 g/m^2 (0,25 oz) supérieur à ces valeurs génériques à cause de l'enduit de finition imprégné dans le tissu durant le processus thermique. Cet enduit peut être à base de mélamine, d'uréthane, de silicone ou encore d'un mélange des trois.

La différence de poids et de solidité des tissus en nylon est liée à la quantité, au type d'enduit ainsi qu'au diamètre des fils. Cette différence s'exprime en deniers, c'est-à-dire le poids de la fibre en grammes pour une longueur de 9 144 mètres (10 000 yards). Le tableau à la fin de cette section donne une comparaison des différents tissus. En outre, des tissus laminés en Mylar ont été testés sur des spis symétriques et asymétriques avec un succès limité, notamment sur les spis asymétriques pour les allures plus serrées où l'allongement et la solidité sont primordiaux. À ces allures, les charges à l'écoute augmentent, et il faut conserver un écoulement attaché ainsi qu'un allongement modéré. L'inconvénient de ces tissus laminés est, ironie du sort, que leur faible allongement rend la voile plus instable. Pour résoudre ce problème, il faut dessiner la voile avec des arrières plus ronds, ce qui permet d'améliorer la stabilité. Un autre problème est que ces tissus laminés se déchirent plus facilement.

Enfin, lorsqu'il s'agit de naviguer à des allures assez lofées comme le petit largue ou le travers, notamment sur des grands bateaux de course, des matériaux tels que le Cuben Fiber, le 3DL et le 3Di se montrent nettement supérieurs aux matériaux laminés en Mylar. Ceux-ci feront l'objet de notre discussion ci-dessous.

Tissu	Poids réel en oz. Par unité de voilerie	Fils de chaîne	Fils de trame
0,5	0,82	30	30
0,75	1,06	30	40
1,5	1,81	70	70
2,2	2,18	140	140

Les avantages et inconvénients des matériaux

Le XXIe siècle a vu la généralisation des bouts-dehors sur les bateaux qui font la part belle aux spis asymétriques. On trouve même de plus en plus de spis asymétriques amurés sur des tangons pour les gréements plus anciens. Des formes plus plates, caractéristiques des angles de vent plus serrés, nécessitent des tissus moins élastiques et des profils que l'on retrouve plus communément sur les génois de près que sur des spis quasi elliptiques. Les spis asymétriques s'apparentent davantage à des ailes. Et le tissu pour ces voiles modernes est plus proche des tissus utilisés pour les focs et génois que des nylons de spis datant d'une vingtaine d'années. Cela est particulièrement vrai pour l'élasticité et la raideur des matériaux. Néanmoins, le nylon demeure une bonne option par son excellente solidité et son faible coût. D'autant que les nylons d'aujourd'hui sont devenus plus légers et sensiblement plus raides grâce aux enduits à faible allongement mis en œuvre. La légèreté passe par des tissages moins épais en ayant recours à des fils de plus faible denier (plus petit diamètre). Les enduits à base d'uréthane contribuent ensuite à combler les trous microscopiques aux croisements des fils en formant des poches de résine, là où les fils ne se touchent pas complètement. Seul un fournisseur au monde produit des fibres polyester haute ténacité comme celles que l'on trouve dans les tissus Dacron pour le près, et seulement dans une gamme réduite de faible denier. Ces fils sont appropriés à la fabrication de tissus suffisamment légers pour les spis. Le polyester est en effet très solide et moins élastique que le nylon, des caractéristiques qui pourraient sembler idéales. Cela dit, quand il s'agit de spinnaker, les propriétés du tissu peuvent être à double tranchant. Ainsi, l'extrême élasticité du nylon le rend très solide malgré un faible grammage. Cette propriété joue le rôle d'un amortisseur en absorbant toute charge forte et soudaine qui déforme la fibre. Celle-ci revient aussitôt à son état initial une fois la charge retirée.

Les voiles en nylon ne sont pas très satisfaisantes en termes de forme quand elles sont soumises à des efforts élevés, mais elles ne cassent pas. Si un spi en nylon est poussé au-delà de sa plage d'utilisation et présente une déformation extrême, il est alors temps de le remplacer. Un spi en polyester, en revanche, a tendance à annoncer le dépassement de sa plage d'utilisation de manière plus brutale… dans un grand fracas ! Le polyester est moins tolérant en termes d'allongement à la rupture. Il est alors essentiel d'avoir recours à des fibres de polyester à haute ténacité, ce qui n'a pas toujours été le cas. Et même avec cette précaution, il est certainement préférable de laisser le polyester entre les mains d'un équipage chevronné qui n'hésitera pas à changer de voile quand le vent forcit.

Dans la catégorie au-dessus du polyester, on trouve plus exotique encore avec les tissus laminés composés de films très fins et de bandes de filaments étalés : le Cuben Fiber (dont North Sails possède les droits exclusifs d'exploitation dans le nautisme). En combinant des bandes très fines d'UHMWPE, disposées selon la chaîne et la trame et laminées entre des films le plus fins possible, on obtient un tissu incroyablement solide et peu élastique. Son grammage peut également être très faible, à partir de 12 g/m^2, soit le tiers du tissu en nylon le plus léger. Une voile constituée d'un tissu très léger se gonfle au moindre souffle d'air. Évidemment, une voile très légère ne peut faire office de spi AP. Sa plage de vent limitée en force ainsi que sa limite de charge à la rupture en font un produit réservé aux experts.

À l'opposé du spectre, on trouve les spis asymétriques conçus pour les angles de portant serrés et fabriqués avec des matériaux qui se rapprochent des tissus de voiles de près de petit temps, tout particulièrement sur les gros bateaux, relativement légers et raides à la toile. Dans ce cas, on a recours à des matériaux à faible allongement, tels que le polyester de portant, un tissu laminé qui combine un film et un scrim polyester. Pour des bateaux plus puissants, on privilégie un matériau plus solide comme le Cuben Fiber. Celui-ci est toutefois remplacé depuis peu par le 3Di Force, un produit ultra-léger qui peut accommoder des formes très volumineuses pour les voiles de portant aux angles plus étroits et soumises à des charges élevées.

La conception des voiles de portant

Rainbow, chef de file de la flotte classe J (voiliers restaurés et répliques) sous spi symétrique S4 lors de la Maxi Yacht Rolex Cup à Porto Cervo, en Italie. Les bateaux de la classe J ont participé à la Coupe de l'America de 1930 à 1937. (Photo Carlo Borlenghi/Rolex.)

On va s'intéresser à l'impact radical de la variation du TWA sur la quantité et le type de traînée générée par une voile de portant. D'un côté, et bien qu'il ne soit pas bordé aussi fort, le génois de tête (MHG) s'apparente à et se comporte comme une voile de près. À l'extrême opposé, un A2 ou A4 sont, eux, conçus pour créer le plus de traînée de pression possible, du moins pour les sections proches du guindant, comme l'avait observé Ted Hood il y a soixante-cinq ans. En conclusion et pour simplifier, plus l'AWA est faible, plus le ratio portance/traînée (L/D) est élevé. Rappelons que l'AWA est fonction de la vitesse du bateau et du TWA. Plus les sections d'une voile sont plates et courtes, plus le ratio L/D est élevé. Cela s'applique aux spis symétriques et asymétriques même si ces derniers présentent l'avantage d'avoir des sections arrière plus tendues et plus vrillées. Lorsqu'un bateau navigue à des angles VMG portant à des vitesses inférieures à la vitesse de carène (c'est-à-dire de 0 à 9 TWS pour la plupart des bateaux modernes), on a recours à des profils de voile plus plats et plus courts.

Quand bien même il ne paraît pas intuitif d'utiliser des voiles plus petites dans le petit temps au VMG, les chapitres 3 et 4 sur l'aérodynamique nous éclairent sur ce point. L'écoulement dans le vent léger est instable, ce qui conduit à une traînée induite accrue parce que l'écoulement peine à quitter le bord de fuite de la voile. En d'autres termes, on atteint une limite de portance que l'on peut générer dans le petit temps, au-delà de laquelle l'augmentation de traînée anéantit le gain de portance. Dans le cas où l'on navigue plus haut que les angles VMG portant optimaux, et particulièrement si l'AWA est inférieur à 90 degrés, le dessinateur cherchera à optimiser le rapport L/D de la même manière que pour les voiles de près. C'est la raison pour laquelle les voiles de travers et largue ont des sections si plates. C'est d'autant plus notable pour les forces de vent où la force de gîte devient problématique, typiquement au-delà de 14 TWS. Quand le vent dépasse les 18 TWS, la traînée de pression devient handicapante pour la VMC parce qu'elle est responsable d'une traînée induite et d'une force de gîte excessives. Cela explique qu'un A1 typique de régate, la voile de VMG de 3 à 9 TWS, est plus plat et plus petit que l'A2, utilisé au VMG de 8 à 22 TWS. Un A4, destiné également au VMG et dont la plage d'utilisation se situe au-delà de 22 TWS – quand l'équipage n'ose plus l'utiliser –, a une surface équivalente à l'A2. Une fois encore, pour ces conditions de VMG portant, on recherche à augmenter la traînée et la portance.

Les marins ont compris depuis longtemps qu'il était plus rapide de tirer des bords que de naviguer plein vent arrière en route directe vers la bouée sous le vent. On en connaît aujourd'hui l'explication aérodynamique : la force du vent ressentie par une voile est égale au produit de la densité de l'air multipliée par le carré de la vitesse du vent apparent divisé par deux. De fait, des températures basses génèrent une force vélique supérieure à celle occasionnée par des températures élevées, tout comme un angle TWA de 145 crée plus de force qu'un TWA de 180. Rappelons que le rôle d'une voile de portant est de convertir l'énergie du vent en une force résultante le plus grande possible (fig. 9.2). Cependant, la force de gîte et, surtout, la traînée augmentent considérablement en même temps que la force totale résultante, ce qui contraint le concepteur de voiles à optimiser le précieux rapport portance/traînée. C'est tout particulièrement vrai pour les bateaux modernes, rapides et qui

génèrent des AWA serrés. Ils font la part belle aux spis asymétriques pour les allures lofées qui désormais s'imposent dans les jeux de voiles.

C'est la capacité de dessiner des sections plates vrillant davantage qui fait la différence. Cela rapproche les voiles de portant des voiles de près. De nos jours, la définition de ces formes passe quasi exclusivement par des outils de dessin assisté par ordinateur (DAO). Ces logiciels de DAO sont très semblables à ceux utilisés dans la conception des ailes d'avion même si les dessinateurs de voiles jalousent le degré de raffinement de ces derniers (chapitre 6). L'avantage principal du DAO est la possibilité de modifier les paramètres numériquement sans avoir à fabriquer le produit. Le code calcule la quantité de pinces nécessaire à chaque panneau constituant la voile. D'ailleurs, ces logiciels opèrent dans un environnement en 3D. Avant l'avènement du DAO, les maîtres-voiliers étaient limités à deux dimensions et avaient recours à des patrons en Mylar sur le plancher. La taille des grands spis imposait d'avoir des centaines de panneaux, et étant donné que leur modification était très onéreuse, seulement quelques panneaux étaient mis en forme. Cette concentration de pinces sur seulement quelques laizes, généralement horizontales, et les jonctions entre sections radiales donnaient lieu à des irrégularités, et parfois à des distorsions.

Dorénavant, la plupart des voiles sont mises en forme avec des pinces entre chaque panneau et sont par conséquent bien plus homogènes. Si l'on se remémore la discussion sur l'aérodynamique, on comprendra mieux l'importance d'une mise en forme homogène pour les voiles de bateaux modernes qui sont de véritables « machines à générer du vent apparent ». Plus une voile dévie le vent, plus il est important que sa forme soit homogène pour assurer une déviation harmonieuse, permettre à l'écoulement de s'échapper facilement du bord de fuite et minimiser la traînée induite. Étant donné les formes peu volumineuses, les pinces distribuées sur les nombreuses laizes sont faibles, et donc la moindre variation donne lieu à une différence notable.

La conception assistée par ordinateur (CAO) est un outil efficace à bien des égards pour les dessinateurs. Comme il existe autant de formes que de bateaux et gréements, on compte une très large base de données de dessins. La CAO permet de facilement reproduire et surtout de mettre à l'échelle un nouveau dessin à partir d'anciens fichiers. Ainsi, on peut adapter des dessins que l'on sait performants à d'autres bateaux. La mise à l'échelle de nombres absolus n'est pas fiable, et il est préférable de l'appliquer aux rayons de courbures.

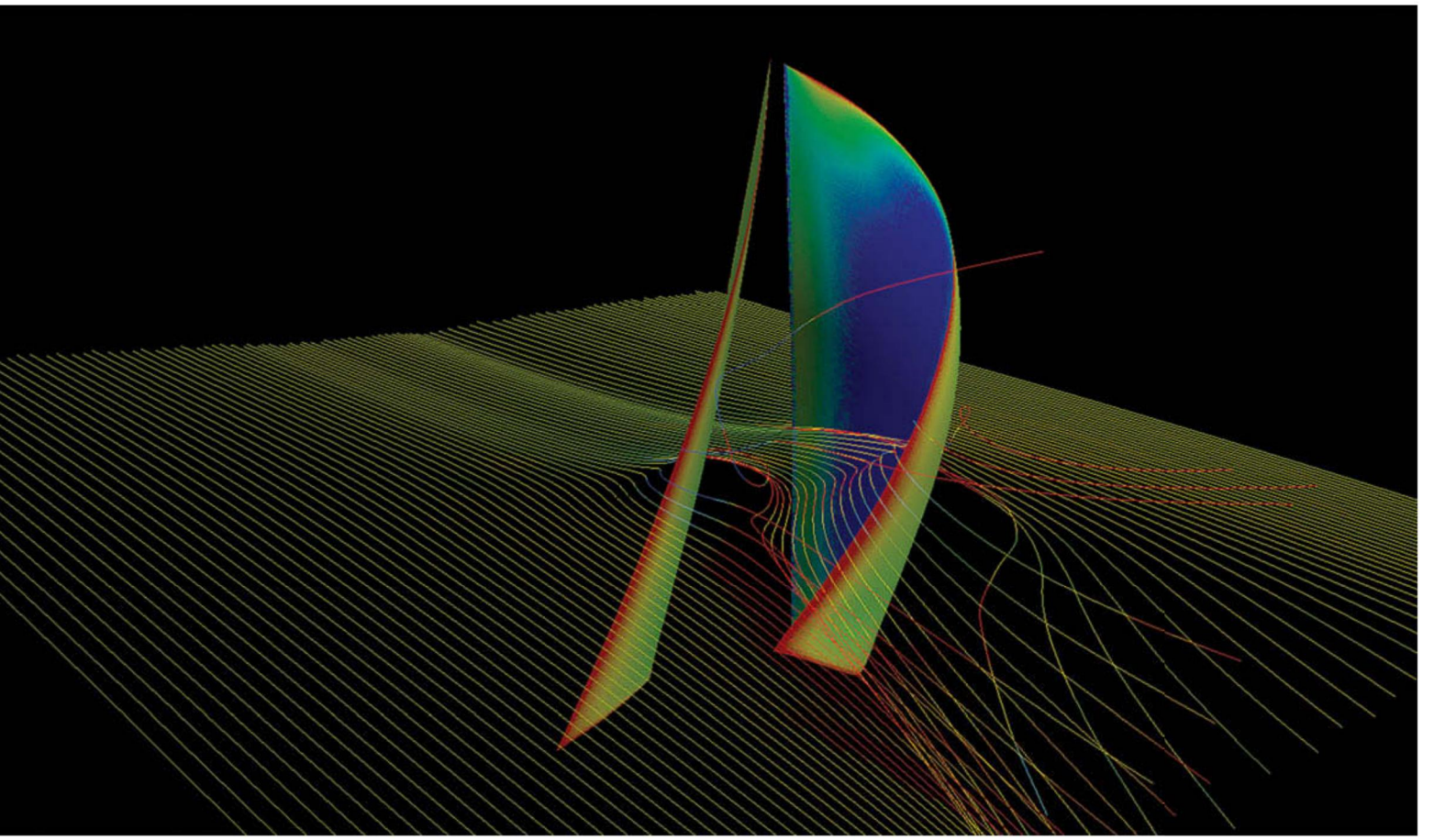
Dans un premier temps, le DAO en 2D s'attachait à automatiser les tâches réalisées sur le plancher à l'aide de patrons en Mylar. Ensuite, le 3D a permis au maître-voilier d'appréhender la voile telle que l'écoulement la perçoit : en 3D. Mais le DAO va bien plus loin que le simple dessin et se meut en CAO. La première étape dans le développement d'une voile de portant à l'aide du DAO est de pouvoir visualiser la forme du produit fini. C'est facile pour les voiles de près. Une photo prise du bon angle et de la bonne position fournira au dessinateur toutes les informations sur les formes volantes dont il pourrait avoir besoin. La tâche est cependant bien plus ardue pour une voile de portant. Il est difficile d'appréhender sa forme depuis le bord, qui plus est, avec une seule photo. Les voiles de portant sont des objets bien plus animés. Alors que plusieurs photos et vidéos prises depuis l'extérieur du bateau peuvent être intéressantes pour les voiles de près, elles deviennent indispensables pour les voiles de portant. Le maître-voilier a besoin de ces multiples points de vue pour reconstituer la forme 3D.

Comme on l'a déjà évoqué, il y a quelque temps, la mise en forme des voiles était concentrée sur seulement quelques laizes, ce qui donnait lieu à des formes irrégulières. Il est fort probable que même un œil aguerri ne saisisse pas ces imperfections depuis le bord du bateau. Cependant, des photos correctement prises mettent en lumière à la fois les faiblesses de la conception (distribution inadaptée du nombre de pinces) et les erreurs de conception (forme non adaptée à la configuration). D'ailleurs, la prise de vue adaptée pour un spi asymétrique est souvent en alignant le point d'amure avec le point d'écoute vus de derrière. Enfin, avec à sa disposition toutes ces données et un ensemble d'outils analytiques et de DAO, le dessinateur a un dernier problème majeur à surmonter : la forme dessinée diffère de la forme volante, celle que perçoit l'écoulement. Ce flux déforme le matériau de la voile, ce qui modifie la forme dessinée à plus d'un égard.

Comparons par exemple deux périodes distinctes de l'année, l'une au printemps et l'autre à l'automne, toutes deux dans 9 TWS à Long Island Sound (estuaire entre New York et Newport, aux États-Unis). La différence de température de l'eau serait de 12 degrés environ, ce qui donnerait lieu à des profils de gradient de vent très différents sur la hauteur de la voile. Sans compter que dans des températures plus basses, l'air serait plus dense et donc la force résultante sur la voile plus importante. Si l'on complique encore un peu le tableau, on observera une variation de la température de l'air selon la hauteur. Ainsi, la variation de la force du vent entre le bas et le haut de la voile serait différente aux deux saisons. Bref, une même voile (une même forme dessinée) aura plusieurs formes volantes possibles dans un TWS donné. Toute la difficulté est alors de comprendre le comportement de la forme créée en DAO. À une époque, on utilisait la photogrammétrie pour avoir un instantané de la forme volante d'une voile de portant et pour aider le dessinateur à mieux l'appréhender. Cependant, cette image n'était valable qu'à l'instant T alors qu'on sait que les spis sont en mouvement constant.

Il y a des années, et parfois encore aujourd'hui, les maîtres-voiliers avaient recours à la soufflerie pour mieux appréhender les formes des voiles de portant. Dans ce cas, le principal obstacle est la mise à l'échelle. Pour des raisons évidentes, il n'est pas concevable de tester des modèles à échelle 1 même pour des bateaux de petite taille, sans parler des gros bateaux. Malheureusement, la mise à l'échelle n'est pas sans répercussion. Au début des années quatre-vingt-dix, North a collaboré avec l'Université d'Auckland en Nouvelle-Zélande pour mettre au point une soufflerie qui reproduise l'effet de gradient du vent naturel. Cette initiative a conduit à de réels progrès, notamment sur les spis asymétriques de l'époque. Le but n'était pas tant de comprendre la forme de la voile en elle-même, mais plutôt de cerner les relations entre les différentes formes au sein d'un jeu de voiles. North a travaillé également avec la soufflerie de Team Oracle – elle aussi une *twisted wind tunnel* (soufflerie à gradient de vent) – pour approfondir sa compréhension sur la relation entre la forme dessinée et la forme volante.

À présent, et tout particulièrement dans le cadre de projets de haut vol comme la Coupe de l'America, la Volvo Ocean Race, les TP 52, les mini-maxi ou encore le HPR, les dessinateurs de North ont recours à des programmes informatiques sophistiqués pour modéliser les voiles et leurs formes volantes résultantes. Ces logiciels ont l'avantage de pouvoir limiter le nombre de paramètres variables que l'on rencontre en soufflerie, d'autant plus sur l'eau, et qui sont difficiles à maîtriser. Cela permet aux dessinateurs de progresser bien plus rapidement. Par exemple, la soufflerie virtuelle de North (VWT, *Virtual Wind Tunnel*) est une modélisation numérique de l'écoulement de l'air autour d'un objet 3D. Ce procédé est loin d'être une tâche aisée. En effet, la définition des conditions initiales et du paramétrage tels que le gradient de vent, le TWS, le TWA, etc., peut conduire à des résultats différents. En outre, dans la partie consacrée aux voiles de près, on a évoqué le code à Éléments Finis (EF) appelé Membrain. On a également montré comment il était couplé avec la CFD, en l'occurrence un logiciel nommé Flow, pour calculer les formes volantes d'une grand-voile et d'un foc à partir de leur forme dessinée. Ce procédé est relativement simple dans la mesure où un simple code à panneaux suffit pour générer des distributions de pression de façon précise. Ce n'est pas le cas pour les voiles de portant qui nécessitent la mise en œuvre d'un code de type RANS. En quoi sont-ils différents ? Pour schématiser, le code à panneaux ne tient pas compte de la viscosité. Cela suppose un écoulement non décroché alors qu'on observe une partie de l'écoulement attachée et l'autre séparée, responsable de la traînée induite. Pour les cas au près, on a vu dans les chapitres sur l'aérodynamique que le ratio portance/traînée est assez élevé. Au portant, la traînée et, par conséquent, la séparation sont des paramètres dominants. Pour capturer ce phénomène, des dessinateurs se sont tournés il y a des années de cela vers des codes RANS pour calculer les cartes de pression. Les codes RANS qui sont bien plus exigeants en termes de puissance de calcul sont à même de modéliser la séparation et peuvent ainsi prédire une forme volante avec plus de précision avant même que la voile ne soit fabriquée. De la même façon qu'au près, on fait appel à un procédé itératif de couplage aéro-élastique entre Membain (EF) et VWT (CFD). C'est-à-dire que la forme dessinée est déformée par la pression du vent, puis cette nouvelle forme volante est réintroduite dans l'écoulement, ce qui modifie à nouveau sa forme, etc.,



Capture d'écran de « Open Foam », la simulation numérique du code RANS pour les voiles de portant, montrant une tranche horizontale de l'effet de la GV et du spi Asy sur l'écoulement en amont. La distribution de pression, telle que prédite par cette simulation, est combinée avec une analyse par éléments finis (FEA, c'est-à-dire Membrain) pour prédire le changement de forme des voiles modélisées. Puis cette nouvelle forme volante est à nouveau traitée via Open Foam et génère un nouvel ensemble de distributions de pression. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. (Photo North Sails, LLC.)

jusqu'à ce que les changements d'une itération à l'autre soient négligeables. On parle alors de convergence (chapitre 6). Mieux encore, avec le VWT, les dessinateurs sont en mesure de modéliser les spis à échelle 1 et ainsi de tenir compte du gradient de vent, mais aussi et surtout de respecter la relation du nombre de Reynolds.

On connaît également toute l'importance du matériau sur la forme volante. Par exemple, les variations de l'élasticité du tissu contribuent aux changements entre la forme dessinée et la forme volante. En utilisant les propriétés du matériau dans la modélisation, on prend en compte ce paramètre. Ainsi, avant d'envoyer la voile en production, le dessinateur peut visualiser la forme volante comme s'il l'observait en navigation depuis un bateau suiveur. L'objectif ultime de l'analyse de voile est la modélisation de plusieurs formes pour prédire la force propulsive avant même que le moindre bout de tissu ne soit coupé. Finalement, le critère entre deux formes sera leur différence en termes de seconde par mille. Cette valeur est calculée à l'aide du programme de prédiction de vitesse (VPP) propre à North.

La fabrication assistée par ordinateur

La CAO est clairement un outil essentiel. Mais sans la FAO (fabrication assistée par ordinateur), l'intérêt de la CAO serait bien moindre. C'est la raison pour laquelle on entend souvent parler de CAO-FAO. D'ailleurs, il est intéressant de noter que la CAO est plus cruciale pour les voiles de portant, surtout celles en nylon, en termes de qualité et réplicabilité, qu'elle ne l'est pour les voiles de près. En effet, comme on l'a évoqué dans la partie sur les tissus, le nylon, utilisé principalement dans la fabrication des A2 et S2, doit pouvoir s'allonger, sans quoi ce tissu très léger se déchirerait. Ce matériau est instable malgré l'ajout d'un enduit de finition. Il est donc très difficile de découper aux ciseaux un tissu le long d'une courbe avec une précision de 0,5 millimètre parce que celui-là bouge, s'effiloche ou se décale. C'est pourtant ce que faisait North tout comme les autres voileries

avant l'introduction au milieu des années quatre-vingt de machines à découper 2D. Et, hormis de gros progrès en termes de vitesse de découpe et de précision, c'est encore aujourd'hui l'outil utilisé pour couper la plupart des tissus de voiles de portant. C'est une partie majeure de l'équipement de CAO du maître-voilier. Si l'on n'est pas capable d'atteindre des tolérances de découpe étroites, la forme de la voile ne sera pas fidèle au dessin.

Au fil des années, les voileries ont mis au point des astuces pour couper les tissus de voiles de portant. L'une d'elles est d'acclimater le matériau aux conditions ambiantes. Par exemple, si le tissu est livré en rouleaux par camion en plein été et qu'il est coupé immédiatement dans l'usine climatisée, le matériau changera de forme après la découpe à cause du changement soudain de température et de l'humidité. Tout navigant en série monotype qui a déjà mis son spi surdimensionné au sèche-linge juste avant la jauge comprendra très bien ce phénomène. Cet exemple, parmi tant d'autres, illustre parfaitement pourquoi un procédé de fabrication maîtrisé à l'aide de la CAO est nécessaire pour obtenir une forme volante homogène et fidèle à la maquette du dessinateur.

Que la théorie puisse s'accorder avec la pratique est évident dans la comparaison ci-dessus. À droite, le résultat d'une étude « Open Foam » qui prédit la forme volante de cet A2 sur un TP 52. À gauche, la photo correspond en fait à la TWA et à la TWS. Notez la similitude très proche, indiquant que la science fonctionne. (Photo North Sails, LLC.)

Trinquette de génois et trinquette de spi

Qui ne se souvient pas des fameux bloopers ? Ils contribuaient à améliorer les performances des bateaux anciens qui avaient des angles de VMG optimaux proches de 180 TWA. De nos jours, avec les bateaux modernes, l'enjeu est désormais de générer plus de portance et moins de traînée. Les voileries qui ont produit un blooper ces vingt dernières années se comptent sur les doigts de la main. On est entré dans l'ère de la trinquette. On va s'intéresser ici à deux types de trinquettes : trinquette de génois (GS : *genoa staysail*) et trinquette de portant (SS : *spinnaker staysail*).

Une GS est un petit foc, souvent sur enrouleur, amuré à l'intérieur du triangle avant principal et utilisé pour le travers et le largue dans des vents supérieurs à 8 TWS. Il est la plupart du temps associé au Jib Top (foc doté d'un point de tire élevé) ou au génois. On a vu au chapitre 4 comment la grand-voile contribuait à réduire la traînée induite et à optimiser la différence de pression (et par conséquent la portance) du foc. La GS peut jouer le même rôle pour le foc. L'un des éléments clés est la capacité des bateaux modernes à border les voiles d'avant à 4 ou 5 degrés d'angle de tire et non pas 9 ou plus sur les anciens bateaux. Au travers ou au largue, la distance entre le Jib Top et la grand-voile est supérieure à celle au près. Le rôle de la trinquette de génois est de combler cette fente et de reproduire le phénomène de circulation observé au près.

La trinquette de portant (SS) est une petite voile sur enrouleur le plus souvent hissée sur la drisse du foc et utilisée entre 10 et 25 AWS au portant. Ce type de voile est communément

Un des premiers traceurs/cutters automatisés X-Y de North Sails à Stratford (Connecticut, États-Unis) en 1984. Aujourd'hui, ces cutters automatiques sont nettement plus robustes et efficaces. (Photo Michael Levitt.)

employé sur des bateaux avec un bout-dehors ou un tangon. On distingue deux tailles de SS : petite et normale. Leur rôle est d'améliorer l'écoulement sur les spis. Cela dit, il peut être compliqué de déterminer le vent minimal à partir duquel les GS ou SS deviennent efficaces. À vrai dire, le meilleur moyen est d'observer la vitesse du bateau. Et, dès que leur apport est neutre, c'est le signe qu'il est temps d'affaler la voile. Étant donné que les SS modernes sont sur enrouleur, cette opération est très facile. Pour revenir au Jib Top mentionné plus haut, sa plage d'utilisation est dans la forte brise au travers et au largue aux alentours de 45 à 60 TWA. L'avantage de son point d'écoute élevé est de diminuer le vrillage de la chute pour en contrôler la partie haute quand on choque. En outre, cela permet d'écarter la bordure de la grand-voile et d'éviter également que celle-ci ne touche l'eau dans les vagues. Tous les navigants ayant participé sur des bateaux anciens aux courses au large les plus exigeantes, comme la Bermuda Race, la Rolex Fastnet ou la Rolex Sydney Hobart, savent que les Jib Tops peuvent exceller dans des plages restreintes de TWA et de TWS. Cependant, avec l'avènement des spis asymétriques de largue plus plats et plus petits comme les A3, A5, A7 et BR0, les Jib Tops ont du mal à trouver leur place.

Toute la discussion ci-dessus s'applique à la croisière, à la différence près que les voileries appellent ces voiles gennakers la plupart du temps. On observe ainsi sur les bateaux de croisière ou course-croisière de toutes tailles une évolution du spi symétrique AP vers le spi asymétrique. De plus, aucun marin sur un croiseur ne prend plaisir à manipuler un tangon lourd et encombrant. C'est pourquoi les bateaux de plaisance sont également équipés de bouts-dehors (bien que plus courts que sur les unités de course) et disposent de plans de pont épurés et parfois même de lignes de contrôle sous le pont, notamment la ligne d'amure du gennaker. Tout cela semble logique, si ce n'est que la plupart des bateaux de croisière sont dotés de carènes anciennes. D'ailleurs, les voiliers de croisière modernes n'ont pas autant évolué que les bateaux de courses et leurs gennakers n'ont pas non plus drastiquement changé.

L'encombrement et les budgets limitent l'inventaire des voiles pour les bateaux de croisière. De plus, la taille des voiles est nettement inférieure à ce qu'autoriserait n'importe quelle jauge parce qu'on est souvent en équipage réduit en croisière. Typiquement, leur inventaire de portant comprend trois voiles au plus. Le G0 qui est dérivé du C0 est un exemple de l'application des enseignements de la régate à la croisière. Le G1 est le gennaker pour les allures portantes serrées alors que le G2 couvre le VMG portant. En effet, chers croiseurs, vous atteindrez, vous aussi, votre destination sous le vent plus rapidement en navigant aux angles VMG optimaux. Si vous devez choisir une voile parmi les trois, vous pouvez demander conseil à votre voilerie, mais vous n'obtiendrez pas de réponse toute faite. Cela dépend du type de votre bateau (récent ou ancien), de la surface de voile (peut-être un G0 pour la Bretagne, mais plutôt un G2 pour la Méditerranée) et de votre façon de naviguer.

Le réglage des voiles de portant

Avec les spis symétriques, la hauteur du tangon doit être constamment ajustée au moindre changement d'AWS[6]. À mesure que la pression sur la voile augmente, le point d'écoute monte. Si on ne monte pas le tangon sur le mât et à l'amure, on crée inévitablement une forme asymétrique bien mal adaptée. Lorsque l'oreille de guindant n'est pas uniforme, cela signifie que le tangon est à la mauvaise hauteur. Et si le haut se plie avant le bas, c'est que le tangon est trop bas et vice versa. En outre, l'angle avant/arrière du tangon doit être en permanence ajusté en fonction de l'AWA, le but étant d'aligner le vecteur de traînée avec le cap du bateau. Pour cela, il faut choquer l'écoute et simultanément reculer la pointe du tangon. Si on va trop loin dans ce sens, l'angle d'attaque devient trop faible. On doit alors surborder le spi pour compenser et la voile s'aplatit, et inversement si la pointe du tangon est trop avancée. Dans ce cas, le spi peut se retrouver masqué derrière la grand-voile.

6 C'est la vitesse de vent apparent qui résulte des vecteurs du TWS et du cap qui importe, et non la vitesse de vent réel.

De manière générale, à l'exception des conditions ventées ou surtoilées, le réglage du spi est relativement simple. À mesure que l'angle d'attaque diminue (refusante), il faut border l'écoute et avancer la pointe du tangon pour éviter à la voile de déventer complètement. Cela s'avère toujours plus rapide et plus efficace que d'essayer d'abattre. Si la voile dévente, non seulement le bateau ralentit, mais il faut un certain temps pour que l'écoulement se rattache. En général, il est plus rapide de choquer le tangon surtout dans les conditions instables. Sur les petits bateaux où il est possible de tenir l'écoute dans une main et le bras dans l'autre, les bons régleurs feront pivoter le spi entier en choquant l'un et en bordant l'autre pour s'adapter aux variations constantes de l'AWA. Cependant, cette technique n'est pas possible sur les gros voiliers. Quoi qu'il en soit, on préférera toujours avoir un régleur expérimenté au réglage du bras dans les conditions musclées, d'autant plus dans une mer formée qui peut balloter le bateau ou dans laquelle le barreur essaie de surfer sur les vagues.

Dans le scénario opposé, c'est-à-dire quand l'angle d'attaque augmente (adonnante), il faut choquer l'écoute et reculer la pointe de tangon pour optimiser la VMG/VMC[7]. En effet, plus on choque l'écoute et plus le vecteur de la traînée s'aligne avec le cap du bateau. En outre, un spi surbordé (ou une pointe de tangon trop avancée) expose moins de surface de voile au vent et produit donc moins de force. En supposant que le barreur tienne un cap constant, deux facteurs peuvent influencer l'angle d'attaque. L'un est un changement de TWD pour un TWS donné. L'autre est une variation de TWS alors que la TWD reste constante, à la différence de l'AWA. Dans le cas d'une baisse de TWS, le bateau maintient sa vitesse momentanément grâce à son inertie et l'AWA varie. À l'inverse, dans une risée, le bateau accélère alors que la TWD reste inchangée, ce qui resserre l'AWA.

Il est important que les régleurs sachent lire les risées ou les molles pour en avertir le barreur qui doit garder son cap surtout s'il navigue en mode VMG. Imaginons que le barreur maintienne son cap à 145 TWA, l'angle optimal de VMG dans 14 TWS. Soudain le vent tombe à 12 TWS. L'AWA se resserre, alors que le TWA reste à 145, c'est-à-dire l'angle VMG idéal. Pour compenser, le régleur expérimenté bordera l'écoute tout en signalant au barreur de ne pas abattre. Si le barreur tire la barre instinctivement pour éviter de déventer le spi, le bateau ne sera plus en VMG optimale une fois la molle passée. À noter que la façon de régler un spi asymétrique est similaire malgré l'absence de tangon[8]. L'élévation du point d'amure au-dessus du pont produit le même effet. Dans ce cas, il s'agit d'obtenir une tension de guindant adéquate. Si le point d'amure est trop haut, le guindant versera sous le vent. Si le guindant est trop tendu, il se pliera sur lui-même et le barreur sera contraint de surborder. De fait, il paraît clair que ce réglage est directement lié à la TWS. Plus la TWS est élevée et l'AWA serré, plus le régleur cherchera à baisser la hauteur du point d'amure. Le réglage de l'écoute d'un spi asymétrique est, lui aussi, semblable à celui d'un spi symétrique, à la différence près que l'ajustement est plus sensible, car la chute peut vriller davantage et plus rapidement.

Pour rappeler une évidence, la chute d'un spi asymétrique, par définition, n'est jamais appelée à devenir le guindant. Elle est donc spécifiquement conçue pour cette fonction. Si cette dernière n'a pas d'impact majeur dans le médium, elle devient un atout déterminant dans le petit temps et la brise (voir explication dans la section intitulée L'aérodynamique des voiles de portant). À savoir que, dans le vent faible, il est capital de minimiser la traînée induite. Pour un même choqué de l'écoute, le bas de la chute du spi asymétrique vrillera bien plus relativement que pour un spi symétrique, ce qui contribue à diminuer la traînée induite. Cela n'est pas possible sur un spi symétrique, car le profil de chute doit être identique à celui du guindant par définition. Par ailleurs, dans la brise, il s'agit de contrôler le moment de gîte. Le vrillage de la chute a pour effet non seulement de diminuer la traînée induite, mais aussi d'abaisser le centre d'effort (CE). Pour les mêmes raisons citées précédemment, l'asymétrique prend l'avantage sur le symétrique dans ce cas de figure. En résumé, on borde moins un

7 Velocity Made Good (VMG) et, pour le large, Velocity Made Good to Course (VMC).

8 Certains bateaux ont un bout-dehors articulé dont la pointe peut pivoter légèrement vers l'arrière et l'extérieur du bateau.

Ci-dessus, un spinnaker de croisière asymétrique, ou gennaker, sur un Morris 52. (Photo Onne van der Wal/North Sails, LLC.)

spi asymétrique qu'un spi symétrique. D'autant qu'un vieil adage de régatier veut qu'on puisse perdre davantage de terrain sur 5 minutes de portant que ce qu'on a pu gagner sur la totalité du bord de près. Cela se vérifie surtout dans le tout petit temps ou à l'inverse dans la forte brise. C'est dans ces conditions extrêmes que le régleur de spis asymétriques gagne ses galons.

Prenons l'exemple d'un bateau de course naviguant au VMG portant (environ 145 TWA) dans 20 TWS quand une rafale à 24 TWS le surprend. Un rapide diagramme des vecteurs vent nous montre que l'AWA augmente jusqu'à ce que le bateau accélère pour refléter la vitesse du vent. Parce que le bateau ne peut pas s'adapter assez rapidement à un changement de direction du vent, le régleur de spis doit immédiatement choquer l'écoute avant que l'écoute et le hale-bas de grand-voile ne soient choqués à leur tour. Sans quoi on s'expose à deux conséquences. La première est l'augmentation de la traînée de pression qui accroît la force de gîte. La seconde est qu'on perd l'occasion d'aligner le vecteur de la force vélique résultante avec le cap du bateau (selon la VMG optimale). Un équipage chevronné au rappel annonce les changements de vent de manière que le régleur puisse anticiper les manœuvres et réagir au moment opportun. Une erreur commune est d'inciter le barreur à naviguer trop bas dans les risées. Cela a certes pour effet de réduire la force de gîte, mais aussi de naviguer plus bas que l'angle VMG optimal. Dans la rafale à 24 TWS, l'angle optimal n'a probablement pas changé contrairement à la vitesse cible. En abattant trop, le barreur empêche le bateau d'atteindre cette vitesse cible jusqu'à ce qu'il lofe à nouveau une fois la risée passée (sauf si la force de gîte devient problématique). Pis encore, une fois la risée dissipée, la vitesse bateau sera inférieure à la vitesse cible parce que le barreur aura abattu. En outre, peu importe les conditions et que ce soit pour un spi symétrique ou asymétrique, la position du point de tire est un autre paramètre clé. Le plus simple est de placer le point de tire fixe le plus en arrière possible sur le bateau et d'ajuster longitudinalement à l'aide de la ligne de twing si besoin. Les ajustements effectués s'apparentent à ceux du foc pour les mêmes raisons. Cependant, pour un spi symétrique, la ligne de twing n'aura pas autant d'impact et, par conséquent, elle ne sera pas aussi critique, tout simplement parce que, comme on l'a vu précédemment, la chute du spi symétrique ne vrille pas autant que celle du spi asymétrique.

Passons aux réglages des trinquettes. Leur géométrie est semblable à celle d'un petit foc. Elles sont donc ajustées de la même manière et avec les mêmes éléments de contrôle que les focs : position du point de tire pour contrôler le vrillage, tension de drisse pour ajuster la position du creux et enfin tension d'écoute pour s'adapter aux variations de l'AWA. Les conséquences d'une trinquette surbordée peuvent être assez dramatiques. À elle seule, elle peut déventer le spi. Le cas le plus évident est quand le TWA est trop élevé, et que la traînée induite de la trinquette affecte le spinnaker.

Mot de la fin

En conclusion, cher lecteur, et mot de la fin, cet ouvrage s'apparente à ce qu'on appelle la science et l'art des voiles, quoique aujourd'hui principalement la science. À bien des égards, cette nouvelle édition diffère de la première écrite il y a vingt-six ans, par son contenu et notamment en raison des énormes progrès de la science au détriment de l'art dans ce domaine.

Nous vous avons emmené sur un parcours initiatique et, même si parfois celui-ci a pu être ardu, la théorie qui se cache derrière la voile devrait vous permettre de mieux appréhender la pratique de ce sport. Nous avons également apporté des éléments historiques sur cet art tout aussi fascinant que complexe, désormais devenu science de la voilerie et des voiles. Notre sport est aussi méconnu que merveilleux. Nous espérons vivement que ce livre vous l'a fait apprécier davantage.

Livres de Tom Whidden

The Art and Science of Sails
Revised Edition
De Tom Whidden et Michael Levitt
North Sails Group, LLC, 2016.

Championship Tactics
De Tom Whidden, Gary Jobson
et Adam Loory
St. Martin's Press, 1990.

The Art and Science of Sails
De Tom Whidden et Michael Levitt
St. Martin's Press, 1990.

Livres de Michael Levitt

The Art and Science of Sails
Revised Edition
De Tom Whidden et Michael Levitt
North Sails Group, LLC, 2016.

Herding Tigers : The North Sails Story
De Michael Levitt
North Technology Group, LLC, 2009.

Ted Hood Through Hand and Eye
De Ted Hood et Michael Levitt
Mystic Seaport, 2006.

The North Sails Story
De Michael Levitt
Fabio Ratti Editoria, 1999.

The America's Cup – the History of
Sailing's Greatest Competition
in the Twentieth Century
De Dennis Conner et Michael Levitt
St. Martin's Press, 1998.

West – The Official Record 1998
Haymarket Specialist Publications Ltd
Publishing, 1998.

The Official Record 1997
Haymarket Specialist Publications Ltd,
1997.

Around the World in 79 Days
De Cam Lewis et Michael Levitt
Delta, 1996.

Learn to Sail
De Dennis Conner et Michael Levitt
St. Martin's Press, 1994.

America's Cup 1851-1992: The Official Record
Graphic Arts Publishing, 1992.

Sail Like a Champion
De Dennis Conner et Michael Levitt
St. Martin's Press, 1992.

The Art and Science of Sails
De Tom Whidden et Michael Levitt
St. Martin's Press, 1990.

Upset : Australia Wins the America's Cup
De Michael Levitt et Barbara Lloyd
Workman Publishing, 1983.

A Tissue of Lies : Nixon versus Hiss
De Dr. Morton Levitt et Michael Levitt
McGraw-Hill, 1979.

Tom Whidden est président et directeur général du groupe North Technology qui inclut North Sails, la plus grande voilerie au monde depuis les années soixante-dix. Également marin de la Coupe de l'America et intronisé au Hall of Fame en 2004, Whidden a remporté le trophée à trois reprises en 1980, 1986-1987 et 1988, principalement en tant que tacticien pour Dennis Conner. Il est l'auteur de trois ouvrages consacrés aux thèmes de la navigation et des voiles.

Auteur de 14 livres, Michael Levitt est aussi l'ancien directeur de la communication du New York Yacht Club et ancien éditeur de publications telles que *Nautical Quarterly* (prix du National Magazine Award for Design), *Sailing World* et *Yachting*. Avec Ted Hood, il a co-écrit l'autobiographie intitulée *Ted Hood Through Hand and Eye* (1970). En 1993, l'IBPA lui a décerné le prestigieux Benjamin Franklin Award dans la catégorie Remarquable/ Loisirs de plein air pour son ouvrage *America's Cup 1851-1992 the Official Record*.

Photo de couverture : *Rambler 88*
(© Daniel Forster)

L'Art et la science des voiles

« Le secteur de la voilerie s'efforce depuis de nombreuses années d'innover dans les nouvelles technologies de fabrication, tout comme celui de la construction navale, pour nous permettre, nous marins, de toujours gagner en performance. Outre les conseils de Tom Whidden sur la navigation théorique et pratique, ainsi que sur le réglage des voiles, cet ouvrage agrémenté de belles images et riche en contenu, illustre les étapes qui ont marqué l'histoire de la voilerie et qui ont façonné ce secteur tel qu'on le connaît aujourd'hui. »
Franck Cammas, navigateur et skipper, vainqueur de la Volvo Ocean Race, Transat Jacques Vabre, Route du Rhum, Petite Coupe de l'America, Trophée Jules Verne, Coupe de l'America, et sacré Marin de l'année en 2012 et 2013.

« Il y a tant à apprendre pour moi et mon équipe de la Volvo Ocean Race dans ce livre. C'est une référence incontournable pour tous ceux et celles qui cherchent à perfectionner leurs compétences de navigation ou de réglage des voiles. »
Ian Walker, skipper vainqueur de la Volvo Ocean Race 2014-2015 sur Abu Dhabi et double médaillé olympique d'argent pour la Grande-Bretagne.

« Un regard fascinant sur l'histoire et la science des voiles et de la voilerie, une industrie devenue aujourd'hui hautement technique. Cet ouvrage explique de façon claire et précise la théorie qui se cache derrière la pratique de la navigation et les technologies innovantes de fabrication des voiles. »
Bora Gulari, deux fois Champion du monde de Moth et consacré Marin de l'année par la fédération américaine de voile et Rolex en 2009.

« L'ouvrage de Tom Whidden et Michael Levitt est un guide clair et sérieux pour tirer le meilleur de ses voiles, un outil essentiel à la bonne navigation en croisière comme en compétition. »
John Rousmanière, écrivain, *The Annapolis Book of Seamanship*.

L'Art et la science des voiles – Première édition

« Ce livre élégamment rédigé mérite de figurer parmi les classiques. »
Sailing World magazine

« Je connais Tom Whidden depuis un bon moment, car il a fait partie de mon équipage sur le 12M Nerfetiti. Il s'est toujours intéressé à l'aspect technique et commercial de la voilerie. Tom a une approche empreinte de bon sens, acquise grâce à son expérience pratique de la course au large. »
Ted Hood, le regretté fabricant de voiles, architecte naval, constructeur de bateaux, développeur de marinas, skipper vainqueur de la Coupe de l'America, Marin de l'Année et leader de l'industrie.

ISBN 979-10-93860-27-5

28,00 euros